KIRKUS YÜZYILIN EN İYİ BİLİM KİTAPLARI SEÇKİSİ



MUAZZAM DÜNYA

Beş Duyunun Ötesine Yolculuk

Çeviri: Şiirsel Taş

ED YONG

MİKROBİYOTA'nın yazarından

domingo

MUAZZAM DÜNYA

Yazar Hakkında

Ödüllü bilim yazarı ED YONG *Atlantic* dergisinin yazarlarındandır. National Geographic bünyesinde Not Exactly Rocket Science adlı blogu hazırlayan Yong'un yazıları *Wired*, *New York Times*, *Nature*, *BBC*, *New Scientist*, *Scientific American* ve *Guardian*'da yayımlanmıştır. İlk kitabı *Mikrobiyota* (Domingo, 2018) *New York Times* ve *Guardian* tarafından yılın kitabı seçilmiştir.
Yong'u X'te @edyong209 hesabından takip edebilir, haftalık e-bülten The Ed's Up'a http://tinyletter.com/edyong209/ adresinden üye olabilirsiniz.

MUAZZAM DÜNYA

Beş Duyunun Ötesine Yolculuk

ED YONG

Çeviri: Şiirsel Taş

domingo

domingo

MUAZZAM DÜNYA
Beş Duyunun Ötesine Yolculuk
ED YONG

Özgün ismi: An Immense World: How Animal Senses Reveal the Hidden Realms Around Us
© 2022 Ed Yong

Türkçe yayın hakları:
© 2025 Bkz Yayıncılık Ticaret ve Sanayi Ltd. Şti.
Domingo, Bkz Yayıncılık markasıdır.
Sertifika No: 46105

Çeviri: Şiirsel Taş
Editör: Algan Sezgintüredi
Son okuma: Ecem Yıldız
Bilimsel danışmanlar: Emrah Çoraman, Fatih Dikmen, Kadir Boğaç Kunt, Kerem Ali Boyla
Kapak tasarımı: Zoe Keller
Kapak ve sayfa uygulama: Özkan Köse

ISBN: 978 605 198 381 3

Baskı: Eylül 2025
Pasifik Basım
Cihangir Mah. Güvercin Cad. No: 3/1 Baha İş Merkezi
A Blok Kat: 2 Haramidere Avcılar, İstanbul
Tel: (0212) 412 17 00 • Sertifika No: 44451

Tüm hakları saklıdır. Bu kitabın tümünün veya içeriğinin herhangi bir bölümünün yayıncının yazılı izni olmadan, fotokopi yöntemi dahil, elektronik ya da mekanik herhangi bir yolla çoğaltılması yasaktır.

Bkz Yayıncılık Ticaret ve Sanayi Ltd. Şti.
Harbiye Mah. Cumhuriyet Cad. Pak Apt. No: 30
Kat: 1 Daire: 3 Şişli İstanbul
Tel: (212) 245 08 39
e-posta: domingo@domingo.com.tr
www.domingo.com.tr

Beni anlayan Liz ve Neeley için

İçindekiler

Giriş:
Tek Hakiki Yolculuk 1

1. Kimyasal Sızdıran Torbalar
Kokular ve Tatlar 15

2. Sonsuz Biçimde Görme
Işık 53

3. Kmor, Ymor, Smor
Renk 86

4. İstenmeyen Duyu
Ağrı 120

5. Çok Soğuk
Isı 139

6. Kaba Bir Duyu
Temas ve Akış 160

7. Dalgalanan Zemin
Yüzey Titreşimleri 193

8. Kulak Kesilmek
Ses 215

9. Sessiz Dünyadan Yansıyan Sesler
Yankılar 249

10. Canlı Piller
Elektrik Alanları 284

11. Onlar Yolu Bilir
Manyetik Alanlar 310

12. Aynı Anda Tüm Pencerelerden Bakmak
Duyuları Birleştirme 331

13. Sessizliği Kurtar, Karanlığı Koru
Tehdit Altındaki Duyu Manzaraları 346

TEŞEKKÜR 368
NOTLAR 371
KAYNAKÇA 389
GÖRSEL REFERANSLARI 451
DİZİN 453

Kimbilir, belki de göğü yara yara uçan her kuşun,
beş duyunun eşiğinden içeri sığmayan
hazlarla dolu muazzam bir dünyası vardır.

–WILLIAM BLAKE

Giriş

Tek Hakiki Yolculuk

İçinde fil olan bir oda hayal edin. Mecazi anlamda züccaciye dükkânına giren fili değil, şu bildiğiniz ağır memeliyi kastediyorum. Diyelim ki oda filin barınabileceği kadar geniş –mesela bir okulun spor salonu– olsun. Şimdi de bir farenin hızla içeri girdiğini hayal edin. Yanında da bir kızılgerdan hoplayarak geliyor. Bir baykuş tepedeki kirişe tünemiş. Bir yarasa tavandan baş aşağı sarkıyor. Bir çıngıraklıyılan kapıdan içeri kayıveriyor. Köşede bir örümcek ağ örmüş. Bir sivrisinek vızıldayarak uçuyor. Saksıdaki bir ayçiçeğinin üzerine bir Bombus arısı konmuş. Giderek kalabalıklaşan bu farazi mekâna son olarak bir de insan ekleyelim. Adı Rebecca olsun. Gören, meraklı ve (neyse ki) hayvanlara düşkün biri. Bu kargaşanın ortasına nasıl düştüğünü merak etmeyin. Tüm bu hayvanların spor salonunda ne aradığına boş verin. Onun yerine Rebecca ve bu hayalî hayvanat bahçesindeki diğer hayvanların birbirlerini nasıl algılayabileceğini düşünün.

Fil hortumunu bir periskop gibi kaldırır, çıngıraklıyılan dilini çıkarıp durur, sivrisinekse antenleriyle havayı yoklar. Üçü de etrafı koklamakta, havadaki kokuları almaktadır. Fil bir şeyin kokusunu almaz. Çıngıraklıyılan farenin kokusunu alınca pusuya yatıp bekler. Sivrisinek, Rebecca'nın nefesindeki çekici karbondioksitin ve cildinin kokusunu alır. Kanını emmek için koluna konar ama ısırmaya fırsat bulamadan Rebecca bir vuruşla onu ezer ve çıkan sesle fare irkilir. Fare panikle cıyaklamaya başlar; çıkardığı ses, yarasanın duyabileceği ama filin duyamayacağı kadar tizdir. Bu sırada fil, farenin ve yarasanın kulakları için fazla pes ama titreşimini çıngıraklıyılanın hassas karnıyla hissedebildiği, derinden gelen ve gök gürültüsünü andıran bir homurtu koyuverir.

Farenin ultrasonik cıyaklamaları ve filin infrasonik homurtusunu duymayan Rebecca, kulaklarının algılayabildiği frekanstaki kızılgerdanı dinlemektedir. Fakat işitme yetisi, kuşun ezgisinde kodlanmış karmaşık nağmelerin hepsini ayırt edemeyecek kadar yavaş çalışır.

Kızılgerdanın göğsü Rebecca'ya kırmızı görünse de gözleri ancak mavi ve sarının tonlarını algılayabilen file öyle görünmez. Bombus arısı da kırmızıyı göremez ama gökkuşağının diğer ucundaki ultraviyole renk tonlarına duyarlıdır. Üzerinde durduğu ayçiçeğinin ortasında, Rebecca'nın göremediği ama hem kuşun hem de arının dikkatini çeken ultraviyole bir merkez daire bulunur. Bu merkez daire, çiçeğin sadece sarı olduğunu düşünen Rebecca için görünmezdir. Odadakiler içinde gözleri en keskin olan Rebecca'dır; filin ya da arının tersine Rebecca, ağının ortasında duran küçük örümceği fark edebilir. Fakat odadaki ışıklar sönünce neredeyse hiçbir şeyi göremez.

Karanlığa gömülen Rebecca, önündeki engellere çarpmamak için kollarını uzatıp yavaş yavaş yürür. Fare de aynısını, etrafında ne var ne yok anlamasını sağlayan bıyıklarını saniyede birkaç kez ileri geri hareket ettirerek yapar. Rebecca, ayakları arasında seğirten farenin seslerini duyamasa da kirişe tünemiş baykuş kolayca duyar. Baykuşun yüzündeki sert tüylerin oluşturduğu yüz diski, sesleri toplayarak hassas kulaklarına yönlendirir. Baykuşun kulaklarından biri diğerine göre biraz daha yukarıdadır. Bu asimetri sayesinde baykuş, farenin ayak seslerini hem yatay hem de dikey düzlemlerde saptayabilir. Fare tam kendisini bekleyen çıngıraklıyılanın menziline girmek üzereyken baykuş dalışa geçer. Yılan, burnundaki iki minik çukurla sıcak nesnelerin yaydığı kızılötesi ışınları algılayabilir. Isıyı fiilen görür ve farenin vücudu bir işaret fişeği gibi parlar. Yılan hamle yapar... ve tam o anda farenin üzerine çullanmak üzere olan baykuşla çarpışır.

Oradakileri zar zor duyan ya da gören örümcek tüm bu kargaşayı fark etmez. Örümceğin dünyasını neredeyse tamamen, duyularının uzantısı gibi davranan ve kendi imalatı bir tuzak olan ağındaki titreşimler tanımlar. Sivrisinek ağa takılınca örümcek, debelenen avını ele veren titreşimleri saptayıp avını öldürmek için harekete geçer. Fakat avına saldırdığı sırada bedenine çarpıp yansıyan yüksek frekanslı ses dalgalarının, bu dalgaları gönderen yarasaya geri döndüğünün farkına bile varmaz.

Yarasanın sonarı o kadar hassastır ki karanlıkta örümceğin yerini bulmakla kalmayıp ağın tam olarak neresinde bulunduğunu da tespit eder.

Yarasa örümceği yerken, kızılgerdan diğer hayvanların çoğunun hissetmediği tanıdık bir çekim hisseder. Hava her geçen gün daha da soğumakta, sıcak güney iklimine doğru göç vakti yaklaşmaktadır. Kızılgerdan, kapalı spor salonunda dahi Dünya'nın manyetik alanını hissedebilir ve iç pusulasının gösterdiği yön olan güneye dönüp pencereden kaçar. Geride fil, yarasa, Bombus arısı, çıngıraklıyılan, biraz kızgın olan baykuş, son derece şanslı olan fare ve Rebecca kalır. Bu yedi hayvan aynı fiziksel ortamda bulunsa da mekânı birbirlerinden tamamen ve şaşılacak ölçüde farklı tecrübe eder. Gezegenimizde yaşayan milyarlarca hayvan türü ve bu türler içerisindeki sayısız birey için de aynısı geçerlidir.* Dünya görüntüler ve dokular, sesler ve titreşimler, kokular ve tatlar, elektriksel ve manyetik alanlarla dolup taşar. Fakat her hayvan, bu dopdolu gerçekliğin ancak küçük bir bölümünden faydalanabilir. Her biri kendi eşsiz duyu baloncuğunun içinde yaşar ve muazzam bir dünyanın incecik bir kesitini sezebilir.

Bu duyu baloncuğu için kullanılan muhteşem bir sözcük var: *Umwelt*. Bu terim, Baltık Almanı zoolog Jakob von Uexküll tarafından 1909'da tanımlandı ve popülerleştirildi.[1] *Umwelt* Almanca "çevre" anlamına gelir ama Uexküll bu terimi, sadece hayvanın içinde bulunduğu ortam anlamında kullanmamıştı. *Umwelt*, bir hayvanın bulunduğu ortamın duyumsayabildiği ve deneyimleyebildiği kısmı, yani *algısal* dünyasıdır. Hayalî odamızın sakinleri gibi aynı fiziksel ortamda bulunmalarına rağmen pek çok canlının Umwelt'i birbirinden tamamen farklı olabilir. Memeli kanı emen kene, vücut ısısı, kılın teması ve ciltten yayılan bütirik asit kokusuyla ilgilenir. Kenenin Umwelt'ini bu üç bileşen oluşturur. Yeşil ağaçlar, kırmızı güller, mavi gökyüzü ve beyaz bulutlar onun harika dünyasının parçası değildir. Kene bütün bunları bile isteye görmezden gelmez. Sadece bunları algılayamaz ve var olduklarını bilmez.

* Aynı tür içinde duyuların ne denli çeşitli olabileceğini anlamak için insanlara bakmanız yeterli. Kırmızıyla yeşil bazı insanlara aynı görünür. Kimilerine göre vücut kokusu, vanilya kokusuna benzer. Kimileri içinse kişniş, sabun tadındadır.

Uexküll hayvan bedenini bir eve benzetir.[2] "Her evin bahçeye bakan pencereleri vardır," diye yazmıştır, "ışık penceresi, ses penceresi, koku penceresi, tat penceresi ve çok sayıda dokunma penceresi. Bahçenin evden görünüşü, bu pencerelerin yapım şekline bağlıdır. Bahçe hiçbir açıdan daha büyük bir dünyanın bir bölümü olarak görünmez. Evin sahip olduğu tek dünyadır o; onun Umwelt'idir. Bizim gözümüze görünen bahçe, evin sakinlerine görünenden temelinde farklıdır."[3]

Bu, o zamanlar radikal bir düşünceydi; bazı çevrelerce hâlâ da böyle olabilir. Uexküll çağdaşlarının çoğundan farklı olarak hayvanları birer makine olarak değil, üzerinde düşünmeye değer iç dünyalara sahip, hissedebilir varlıklar olarak görüyor, insanların iç dünyasını diğer türler karşısında yüceltmiyordu. Umwelt'i birleştirici ve eşitleyici bir kuvvet olarak görüyordu. İnsanın evi keneninkine göre daha geniş bir bahçeye bakan, daha çok penceresi olan, daha büyük bir evdir belki ama nihayetinde biz de içeride sıkışıp kalmış, dışarıya bakıyoruzdur. Bizim de Umwelt'imiz sınırlıdır ama bize öyle *gelmez*. Sanki her şeyi kapsıyormuş gibidir. Bütün bildiğimiz ondan ibaret olduğundan, *bilinebilecek* her şeyin ondan ibaret olduğu yanılgısına düşüveririz. Oysa bu, her hayvanın yaşadığı ortak bir yanılsamadır.

Köpekbalıklarının ve ornitorenklerin hissedebildiği zayıf elektrik alanlarını biz hissedemeyiz. Kızılgerdanların ve deniz kaplumbağalarının saptayabildiği manyetik alanları fark edemeyiz. Bir balığın sudaki görünmez izini fok gibi süremeyiz. Bir vızıltının yarattığı hava akımını gezgin örümcek gibi hissedemeyiz. Kulaklarımız kemirgenlerin ve sinekkuşlarının ultrasonik, fillerin ve balinaların infrasonik çağrılarını duyamaz. Gözlerimiz çıngıraklıyılanların saptayabildiği kızılötesi radyasyonu, kuşların ve arıların hissedebildiği ultraviyole ışığı göremez.

Duyularımız hayvanlarla ortak olsa bile onların Umwelt'i bizimkinden çok farklı olabilir. Bazı hayvanlar, bize mutlak sessizlik gibi gelen sesleri duyabilir, zifiri karanlıkmış gibi görünen renkleri görebilir, yaprak kımıldamıyormuş gibi gelen ortamdaki titreşimleri hissedebilir. Kimi hayvanların gözleri üreme organlarında, kulakları dizlerinde, burnu uzuvlarındadır ya da derisi olduğu gibi dilden ibarettir. Denizyıldızı kollarının ucuyla, denizkestanesiyse bütün vücuduyla görür.

Yıldız burunlu köstebek çevresini burnuyla hisseder, manatilerse dudaklarını kullanır. Duyusal açıdan biz de altta kalmayız. İşitme yetimiz güçlü olmakla beraber, kulağı olmayan milyonlarca böceğinkine göre elbette daha iyidir. Gözlerimiz alışılmadık derecede keskindir; hayvanların bedenlerinde olup da kendilerinin göremediği desenleri fark edebiliriz. Her tür bazı açılardan kısıtlı, bazı açılardan özgürdür. O nedenle bu kitap, hayvanları duyularının keskinliğine göre çocukça bir çabayla sıraladığımız listeler içeren ve yalnızca becerileri bizimkileri aşanlara değer veren bir kitap değil. Bu kitap üstünlük değil, çeşitlilik hakkında.

Ayrıca bu kitapta hayvanları hayvan olarak ele alıyoruz. Bazı biliminsanları, kendimizi daha iyi anlamamız için diğer hayvanların duyularını inceler, kendi duyu sistemlerimizin nasıl çalıştığını anlamak için elektrikli balıklar, yarasalar ve baykuşlar gibi istisnai canlıları "model organizmalar" olarak kullanırlar. Bazılarıysa hayvan duyularını tersine mühendislik yöntemiyle çözerek yeni teknolojiler yaratır: Istakozun gözleri uzay teleskoplarının yapımına ilham vermiş, asalak sineklerin kulakları işitme cihazlarını etkilemiş, yunusların sonar sistemi üzerinde yapılan çalışmalar sayesinde askerî sonar daha da geliştirilmiştir. Her ikisi de makul motivasyonlar ama ben ikisiyle de ilgilenmiyorum. Hayvanlar, insan yerine kullanılan dublör ya da beyin fırtınası seanslarının malzemesi değildir. Hepsi kendi başına değerlidir. Biz bu kitapta hayvan duyularını *onların* yaşamını daha iyi anlamak için inceleyeceğiz. "Onlar, yitirdiğimiz ya da hiç kazanmamış olduğumuz duyuların uzantıları sayesinde bizim asla duyamayacağımız seslerle yaşar, bitmiş ve eksiksiz biçimde hareket ederler," diye yazmıştı Amerikalı doğabilimci Henry Beston. "Onlar biraderlerimiz değil, onlar astımız değil: Onlar da bizimle yaşamın ve zamanın ağına yakalanmış başka uluslar, yeryüzündeki ihtişamın ve eziyetin tutsaklarıdır."[4]

Yolculuğumuz sırasında birkaç terim bize yol gösterecek. Hayvanlar, dünyayı algılamak için ışık, ses ya da kimyasallar gibi *uyaranları* saptayıp elektriksel sinyallere dönüştürür.[5] Bu sinyaller nöronlar boyunca ilerleyerek beyne ulaşır. Uyaranları saptayan hücrelere *reseptör* (almaç) denir: Fotoreseptörler ışığı, kemoreseptörler molekülleri, mekanoreseptörler basıncı ya da hareketi saptar. Bu reseptör hücreler çoğunlukla gözler, burun ve kulaklar gibi *duyu organlarında* yoğundur. Duyu

organları, onlardan gelen sinyalleri ileten nöronlar ve beynin bu sinyalleri işleyen bölümleri hep birlikte *duyu sistemleri* olarak adlandırılır. Örneğin görme sistemi, gözlerden, gözün yapısındaki fotoreseptörlerden, görme siniri ve beyindeki görme korteksinden oluşur. Bu yapıların hepsi görme duyumuzu meydana getirir.

Önceki paragraf bir lise biyoloji kitabından alınmış olabilirdi. Ama bir an için durup nasıl bir mucizeyi açıkladığını düşünün. Işık sadece elektromanyetik radyasyondur. Ses sadece basınç dalgalarıdır. Kokular sadece küçük moleküllerdir. Bırakın bunları elektriksel sinyallere çevirmeyi ya da o sinyallerden gün doğumunun muhteşem görüntüsünü, bir canlının sesini veya taze ekmek kokusunu türetmeyi, bu uyaranlardan herhangi birini saptayabilmemiz bile mucizedir. Duyular, dünyanın sürüp giden kaosunu kavrayışa ve deneyime, yani tepki verebileceğimiz ve ona göre hareket edebileceğimiz şeylere dönüştürür. Duyular biyolojinin fiziği ehlileştirmesini sağlar. Uyaranları *enformasyona* çevirir. Rastlantısallıktan bağlantı, çeşitlilikten anlam çıkarır. Hayvanların bulundukları ortamla bağlantı kurmasını sağlar. Dahası jestler, mimikler, davranışlar, sesler ve akımlarla hayvanları birbirine bağlar.

Duyular bir hayvanın saptayabileceklerini ve yapabileceklerini sınırlandırarak yaşamını kısıtlar. Ama aynı zamanda bir türün geleceğini ve önündeki evrimsel olasılıkları belirler. Örneğin 375 milyon yıl önce bir balık sudan çıkıp karasal yaşama uyum sağlamaya başladı. Bu öncüler –yani atalarımız– karada, sudakine göre çok daha uzak mesafeleri görebiliyordu. Nörobilimci Malcolm MacIver'a göre bu değişim, planlama ve stratejik düşünme gibi zihinsel becerilerin evrimini teşvik etti.[6] Bu hayvanlar önlerine çıkana doğrudan tepki vermek yerine önlem alabiliyorlardı. Uzağı görerek ileriyi düşünebiliyorlardı. Umwelt'leri genişledikçe zihinsel kapasiteleri de arttı.

Umwelt sonsuza kadar genişleyemez tabii. Duyular karşılığında hep bir bedel ödenir. Hayvanların, gerektiğinde ateşleyebilmek için duyu sistemlerindeki nöronları her an hazır tutmaları gerekir.[7] Yorucu bir iştir bu; yayı gerip oku atmak için doğru ânın gelmesini beklemeye benzer. Gözleriniz kapalıyken bile görme sisteminiz rezervlerinizi önemli ölçüde boşaltmaya devam eder. Bu nedenle hiçbir hayvan her şeyi iyi algılayamaz.

Hiçbir hayvan bunu istemez de zaten. Aksi takdirde her hayvan, çoğu kendisiyle hiç ilgisi olmayan bir uyaranlar selinde boğulurdu. Duyular kendi gereksinimlerine göre evrilir ve sonsuz sayıdaki uyaran arasında alakasız olanları eleyip besin, barınma, tehlikeler, müttefikler ya da eş seçimiyle ilgili sinyalleri yakalar. Duyular, beyne yalnızca en önemli bilgiyle gelen, feraset sahibi asistanlar gibidir. Uexküll, kene hakkında yazarken* hayvanın etrafındaki zengin dünyanın hepi topu üç uyarandan ibaret, "küçülmüş ve yoksullaşmış bir yapıya dönüştüğü"ne dikkat çekiyordu.[9] "Ne var ki bu ortamın yoksulluğu eylemin kesinliği için gereklidir ve kesinlik elbette zenginlikten daha önemlidir." Hiçbir canlı her şeyi algılayamaz, algılaması da gerekmez. Umwelt'lerin var olma nedeni budur. Bir başka canlının Umwelt'i üzerinde düşünmenin bu denli insani ve derin olmasının sebebi de. Duyularımız, ihtiyacımız olanı süzgeçten geçirir. Geri kalanını anlamak için öğrenmeyi seçmek gerekir.

Hayvanların duyuları insanları binlerce yıldır büyülüyor ama hâlâ çözülememiş pek çok gizem var. Umwelt'i bizimkinden en farklı olan hayvanların çoğu ulaşılamaz, ayak basılamaz yerlerde, örneğin bulanık nehirlerde, karanlık mağaralarda, açık okyanusta, abisin derinliklerinde ve toprağın altında yaşar. Bu hayvanların doğal yaşamını yorumlamak şöyle dursun, gözlemlemek bile zordur. Çoğu biliminsanı, esaret altında tutulabilen hayvanları, beraberindeki tüm tuhaflıklarıyla incelemekle sınırlıdır. Laboratuvarlarda bile hayvanlarla çalışmak zordur. Hayvanların duyularını nasıl kullandığını gösterebilecek deneyler tasarlamak –özellikle de o duyular bizimkilerden çok farklıysa– güçtür.

Şaşırtıcı yeni ayrıntılar ve bazen de tamamen yeni duyular keşfediliyor. Dev balinaların alt çenesinin ucunda bulunan voleybol topu büyüklüğündeki sensör ancak 2012'de keşfedildi ve işlevi hâlâ tam olarak bilinmiyor.[10] Bu sayfalarda anlatılan hikâyelerden bazıları onlarca yıl hatta asırlar öncesine dayanıyor; bazılarıysa kitabı yazdığım sırada ortaya çıktı. Pek çok şeyi hâlâ açıklayamıyoruz. "Atom fizikçisi babam bir keresinde

* 1987'de Alman biliminsanı Rüdiger Wehner bunları "eşleşen filtreler" olarak tanımlamıştı.[8] Bu tanım, duyu sistemlerinin, hayvanın en fazla gereksindiği duyusal uyaranları algılayacak şekilde ayarlanmış olduğunu ifade eder.

bana birkaç soru sordu," diyor duyu biyoloğu Sönke Johnsen. "Birkaç *bilmiyorum* yanıtının ardından, *siz de hiçbir şey bilmiyormuşsunuz*, dedi." Bu diyalogdan ilham alan Johnsen 2017'de "Aslında Hiçbir Şey Bilmiyoruz, Değil mi? Duyu Biyolojisindeki Açık Uçlu Sorular" başlıklı makalesini yayımladı.[11]

Basit görünen şu soru üzerinde düşünelim: *Kaç duyu var?* Yaklaşık 2.370 yıl önce Aristoteles insanların ve diğer hayvanların beş duyusu olduğunu yazmıştı: görme, işitme, koku, tat ve dokunma. Bu sayı hâlâ geçerliliğini koruyor ama filozof Fiona Macpherson'a göre şüphelenmemiz için nedenler var.[12] Öncelikle Aristoteles, insanlardaki birkaç duyuyu gözden kaçırmıştı: dokunmadan farklı olarak kendi bedeninizle ilgili farkındalığınızı sağlayan propriyosepsiyon ve hem dokunma hem de görmeyle bağlantılı olan denge duyusu.

Bazı hayvanların duyularının sınıflandırılması daha da zordur. Birçok omurgalıda kokuları saptamak için vomeronazal organ denen yapının yönettiği ikinci bir duyu sistemi bulunur. Bu, onların ana koku duyusunun bir parçası mıdır yoksa ayrı bir şey mi? Çıngıraklıyılanlar avlarının vücut ısısını saptayabilir ama ısı sensörleri beyinlerinde görme merkezine bağlanır; o halde ısı duyusu görmenin bir parçası mıdır yoksa farklı bir şey mi? Ornitorengin gagası elektrik alanlarını saptayan ya da basınca duyarlı sensörlerle doludur; ornitorenk beyni bu enformasyon nehirlerini farklı şekilde mi ele alır yoksa bunlar tek bir elektro-dokunma duyusu mu oluşturur?

Macpherson, *The Senses* adlı kitabında bu örnekler bize, "duyuların sınırlı sayıda çeşide net olarak ayrılamayacağını" gösterir, diye yazar.[13] Hayvan duyularını Aristotelesçi kategorilere sıkıştırmak yerine olduğu gibi incelemeliyiz.* Bu kitabı her ne kadar ışık veya ses gibi belirli

* Azami düzeyde indirgemeci bir yaklaşımla aslında sadece iki duyu bulunduğunu iddia etmek mümkün: kimyasal duyu ve mekanik duyu. Koku, tat ve görme kimyasal duyulardır. Dokunma, işitme ve elektriksel duyularsa mekanik duyulardır. Manyetik duyu her iki kategoriye de girer. Bu çerçeve muhtemelen şimdilik hiçbir anlam ifade etmiyor ama kitabın ilerleyen bölümlerinde daha fazla açıklık kazanacak. Sınıflama heveslisi değilim fakat bu yaklaşım, duyular üzerine düşünmenin yollarından biri olduğu gibi, aranızdaki sınıflama meraklılarına da cazip gelebilir.

uyaranlar etrafında şekillenen bölümler halinde yazmış olsam da bunu büyük ölçüde kolaylık olsun diye yaptım. Her bölümde, hayvanların her bir uyaranla neler yaptığı anlatılıyor. Ne kaç duyu olduğuyla ilgileneceğiz ne de "altıncı his"e dair ipe sapa gelmez laflar edeceğiz. Onun yerine, hayvanların duyularını nasıl kullandığı sorusunu soracak, Umwelt'lerine adım atmaya çalışacağız.

Hiç kolay olmayacak. Amerikalı düşünür Thomas Nagel, 1974 tarihli klasikleşmiş denemesinde diğer hayvanların, doğaları gereği öznel olan ve tarif edilmesi güç, bilinçli deneyimler yaşadığını iddia etmişti. Örneğin yarasalar dünyayı sonarları aracılığıyla algılar ve çoğu insan bu duyuya sahip olmadığından, "bunun, tecrübe ya da hayal edebileceğimiz herhangi bir şeyle öznel bir benzerliği olduğunu düşünmemiz için bir neden yok," diye yazmıştı Nagel.[14] Kendinizi yarasalarınki gibi perdeli kollarla ya da ağzınızda böceklerle hayal edebilirsiniz ama yaptığınız şey aslında bir yarasa olarak *kendinizin* zihinsel bir karikatürünü yaratmaktır. "Yarasa olmanın bir *yarasa* için nasıl bir şey olduğunu bilmek istiyorum," der Nagel. "Fakat bunu hayal etmeye çalışsam da zihnimin kaynaklarıyla sınırlıyım ve o kaynaklar bu iş için yetersizdir."

Diğer hayvanları düşünürken kendi duyularımız, bilhassa görme duyumuz bizi yanıltır. Türümüz ve kültürümüz o kadar görme odaklıdır ki doğuştan görme engelli olanlar dahi dünyayı görsel içerikli sözcükler ve metaforlarla tarif eder.* İnsanların *görüşleriyle* hemfikir olur, yeni *bakış açıları* ediniriz. Bazen gerçeklere karşı *kör* oluruz. Umut dolu yarınlar *parlak* bir gelecek demektir; distopyalarsa *karanlıktır*. Biliminsanları bile, elektrik alanlarını saptama yetisi gibi insanlarda bulunmayan duyuları tanımlarken *görüntüler* ve *gölgelerden* bahseder. Dil bizim için hem nimet hem de lanettir. Bize başka bir hayvanın Umwelt'ini tasvir etmek için gerekli araçları verirken, bu tasvire kendi duyusal dünyamızı da katar.

Hayvan davranışları konusunda çalışan akademisyenler çoğu zaman insanbiçimciliğin (insanın duygularını ve zihinsel yetilerini uygunsuz biçimde hayvanlara atfetme eğilimi; antropomorfizm) tehlikelerini

* Kitap boyunca diğer duyuları tasvir ederken görsel metaforlardan kaçınmanın son derece zor olduğunu söylemeliyim. Öyle yapmaya ya da en azından görsel terimlere başvurmam gerektiğinde makul ve açık olmaya çalıştım.

tartışırlar. Fakat insanbiçimciliğin belki de en yaygın görülen ama en az bilinen şekli, diğer Umwelt'leri unutma eğilimimiz ve hayvanların yaşam çerçevesini *onların* duyularına göre değil, *kendi* duyularımıza göre çizmemizdir. Bu yanlılığın bedelleri vardır. Dünyayı, onların duyularına fazla gelen ya da onları sersemleten uyaranlarla doldurarak hayvanlara zarar veriyoruz; kıyılardaki yapay ışıklar yumurtadan yeni çıkmış kaplumbağa yavrularını tuzağa düşürerek okyanustan uzaklaştırır, suyun altındaki gürültü balinaların çağrılarını boğar, pencere camları yarasa sonarına su kütlesi gibi görünür. Bize en yakın hayvanların ihtiyaçlarını yanlış yorumlar, koku yönelimli olmalarına rağmen köpeklerin sağı solu koklamasını engeller, onlara insanların görsel dünyasını dayatırız. Hayvanların neler yapabileceğini hafife almak kendi zararımızadır çünkü doğanın aslında ne kadar engin ve muhteşem olduğunu, William Blake'in ifadesiyle "beş duyunuzun kapalı olduğu" güzellikleri anlama fırsatı elden kaçar.

Bu kitapta, hayvanların uzun zamandır olanaksız ya da absürt görülen becerileriyle karşılaşacağız. Yarasaların sonar sistemini keşfedenlerden zoolog Donald Griffin, biyologların fazlasıyla "basitlik filtreleri"nin etkisi altında kaldığını yazmıştı.[15] Yani biyologlar, inceledikleri duyuların, topladıkları verilerin sanılandan daha karmaşık ve gelişmiş olabileceği ihtimalini göz önüne almakta isteksizdiler. Bu hayıflanma, en basit açıklamanın genellikle en iyi açıklama olduğunu söyleyen Occam'ın usturası ilkesiyle çelişir. Oysa bu ilke *gerekli bütün bilgiye sahip olmanız koşuluyla* geçerlidir. Griffin'se öyle olmayabileceğini anlatmak istiyordu. Bir biliminsanının diğer hayvanlar hakkındaki açıklamaları, topladığı verilere; verileri, sorduğu sorulara; soruları, hayal gücüne dayanır; hayal gücüyse duyularıyla sınırlıdır. İnsan Umwelt'inin hudutları, diğer canlıların Umwelt'lerini çoğu zaman anlaşılmaz kılar.

Griffin'in sözleri, hayvan davranışıyla ilgili çapraşık ya da paranormal açıklamalara açık çek vermez. Gerek Griffin'in sözlerini gerekse Nagel'ın denemesini bir tevazu çağrısı olarak görüyorum. Bu ifadeler, diğer hayvanların ne denli karmaşık olduğunu ve yere göğe sığdıramadığımız zekâmıza rağmen başka canlıları anlamamızın ya da onların duyularına kendi duyularımızın penceresinden bakma eğiliminden kaçınmamızın ne kadar zor olduğunu bize hatırlatır. Bir hayvanın yaşadığı ortamın fiziksel koşullarını inceleyebilir, nelere tepki

verip neleri görmezden geldiğine bakabilir, duyu organlarını beynine bağlayan nöron ağının izini sürebiliriz. Fakat bir yarasa, fil ya da örümcek olmanın nasıl bir şey olduğunu anlamak, psikolog Alexandra Horowitz'in "bilgiye dayalı hayalî sıçrama" olarak adlandırdığı durumu gerektirir.[16]

Birçok duyu biyoloğunun bir sanat geçmişi vardır ve bu geçmiş, beynimizin otomatik olarak yarattığı kavramsal dünyaların ötesini görmelerini sağlayabilir. Örneğin Sönke Johnsen, hayvanlarda görme duyusu üzerine çalışmaya başlamadan önce resim, heykel ve modern dans alanlarında çalışmıştı. Johnsen, etrafımızdaki dünyayı betimlemek için sanatçıların zaten Umwelt'lerinin sınırlarını zorlamak ve "görünenin altındakini etraflıca incelemek" zorunda olduğunu söylüyor. Bu kapasite, Johnsen'in "algısal dünyaları farklı hayvanlar hakkında düşünmesine" yardımcı olmaktadır. Johnsen birçok duyu biyoloğunun algısal çeşitliliğe sahip olduğuna dikkat çekiyor. Sarah Zylinski mürekkepbalığının ve diğer kafadanbacaklıların görme duyusu üzerine çalışıyor. Zylinski'de prosopagnozi [yüz körlüğü] olduğundan bildiği insanların yüzlerini, hatta annesininkini bile tanıyamıyor. Kentaro Arikawa, kelebeklerde renkli görme üzerine çalışıyor ve renk körü. Suzanne Amador Kane, tavus kuşlarının görsel ve titreşimsel sinyallerini araştırıyor; kendisiyse renkli görme açısından iki gözü arasındaki hafif farklılıktan ötürü biraz daha kızılımsı görüyor. Johnsen, bazıları "bozukluk" damgası yiyebilecek bu farklılıkların, aslında insanları kendi Umwelt'lerinin dışına çıkıp başka canlılarınkini kucaklamaya yatkın kılabileceğini düşünüyor. Belki de dünyayı alışılmadık biçimlerde deneyimleyen insanlar, tipik olmanın sınırları konusunda sezgisel bir hisse sahiptir.

Bunu hepimiz yapabiliriz. Bu kitabın başında, farazi hayvanlarla dolu bir odayı kafanızda canlandırmanızı istedim; bundan sonraki on üç bölüm boyunca hayal gücünüzü aynı şekilde kullanmanızı rica ediyorum. Nagel'ın da söylediği gibi, kolay olmayacak. Ama gülü seven, dikenine katlanır. Doğanın Umwelt'lerine yapacağımız bu yolculukta sezgilerimiz en büyük sorumluluğumuz, hayal gücümüzse en önemli servetimiz olacak.

***

1998 yılı Haziran ayında, bir sabah geç saatlerde, Mike Ryan ile eski öğrencisi Rex Cocroft, Panama yağmur ormanlarında yürüyorlardı. Ryan genellikle kurbağaları arardı ama Cocroft bitki özsuyuyla beslenen ağaçpireleriyle ilgileniyordu ve arkadaşına bu böceklerle ilgili ilginç bir şey göstermek istiyordu. Araştırma istasyonundan çıkan ikili arabayı yol kenarına çekip nehir boyunca yürümeye başladı. Cocroft aradığı çalıyı görünce birkaç yaprağı kaldırdı ve *Calloconophora pinguis* türü bir ağaçpiresi ailesi buldu. Siyah sırtlarında Elvis'in saçı gibi öne doğru kubbemsi bir çıkıntı bulunan yavrular annelerinin etrafını sarmıştı.

Ağaçpireleri, üzerinde bulundukları bitkiler yoluyla titreşimler göndererek haberleşir. Bu titreşimler işitilebilir olmasa da sese kolayca dönüştürülebilir. Cocroft bitkiye basit bir mikrofon tutturup Ryan'a bir kulaklık uzattı ve dinlemesini söyledi. Ardından yaprağı kopardı. Anında kaçışan yavru ağaçpireleri karın kaslarını kasarak titreşimler yaydı. "Koşuşmaya benzer bir gürültü olacağını düşünmüştüm," diyor Ryan. "Ama duyduğum ses, inek mölemesine benziyordu." Derinden gelen ve yankılanan, bir böcekten çıkması beklenmeyecek bir sesti. Yavrular sakinleşip annelerinin yanına dönünce titreşimli möleme kakofonisi eşzamanlı bir koroya dönüştü.

Hâlâ onları seyreden Ryan kulaklığı çıkardı. Etrafında kuşların öttüğünü, uluyan maymunların böğürtüsünü, böceklerin cırıltısını duydu. Ağaçpireleri susmuştu. Ryan kulaklığı tekrar taktığında yaşadıkları için "tamamen farklı bir dünyaya geçmiştim" diyor. Cengelin gürültüsü bir kez daha Ryan'ın Umwelt'inden çıkmış, möleyen ağaçpireleri geri gelmişti. "Yaşadığım en muhteşem deneyimdi," diyor Ryan. "Duyusal bir yolculuktu. Aynı yerdeydim ama iki harika dünya arasında gidip geliyordum. Bu, Uexküll'ün fikrini gösteren çarpıcı bir örnekti."

Umwelt kavramı, her canlının kendi duyularına hapsolduğunu ima ettiğinden kısıtlayıcı görünebilir. Ama bana kalırsa bu fikir olağanüstü kapsayıcı. Zira hiçbir şeyin göründüğü gibi olmadığını ve deneyimlediğimiz her şeyin, *deneyimleyebileceklerimizin* süzgeçten geçmiş hali olduğunu anlatır. Karanlığın içinde ışık, sessizliğin içinde ses, yokluğun içinde varsıllık olduğunu hatırlatır. Tanıdık olanın içinde yabancının, gündelik olanın içinde sıradışı olanın, sıradanlığın içinde ihtişamın göz kırptığına işaret eder. Bir bitkiye mikrofon iliştirmenin cesur bir

keşif olabileceğini gösterir. Umwelt'ler arasında gidip gelmek ya da en azından denemek, yabancı bir gezegene ayak basmaya benzer. Nitekim Uexküll eserini bir "seyahat kitabı" olarak tanımlamıştı.

Diğer hayvanlara dikkatli baktığımızda kendi dünyamız genişler ve derinleşir. Ağaçpirelerini dinlediğimizde, bitkilerdeki sessiz titreşimlerle söylenen şarkıları fark ederiz. Dolaşmaya çıkmış bir köpeği izlerken, şehir sakinlerinin yaşam öyküleriyle geçmişlerinden izler taşıyan karmakarışık koku ağını görürüz. Yüzen bir foku seyrederken, suyun yollar ve izlerle dolu olduğunu anlarız. Foklar ve denizaslanlarını araştıran duyu biyoloğu Colleen Reichmuth, "Bir hayvanın davranışına o hayvanın gözünden baktığınızda, dikkatinizden kaçan bütün bu çarpıcı enformasyon bir anda fark edilir hale gelir," diyor. "O bilgiye sahip olmak, sihirli bir büyüteçle bakmaya benzer."

Malcolm MacIver, hayvanlar karaya çıktığı zaman, uzun görme menzilinin, planlama ve yüksek bilişin evrimini teşvik ettiğini savunuyor: Hayvanların Umwelt'leri genişlemiş, zihinleri de buna ayak uydurmuştu. Benzer şekilde başka Umwelt'lere dalmak, daha ileriyi görmemizi ve daha derinlemesine düşünmemizi sağlar. Bu bana, Hamlet'in Horatio'ya söylediklerini hatırlatıyor: "Yerde ve gökte daha öyle şeyler var ki Horatio, senin felsefen rüyada bile göremez onları." Bu alıntı çoğunlukla doğaüstü olanı kucaklamaya çağrı olarak düşünülür. Bense doğal olanı daha iyi anlamaya yönelik bir çağrı olduğunu düşünüyorum. Paranormal duyular, son derece kısıtlı olduğumuz ve bu kısıtlılıkların farkına bile varmadığımız için bize öyle görünür. Filozoflar, akvaryumun dışındaki dünyadan habersiz olan balığa uzun zamandır acımaktadırlar. Oysa duyularımız da bizim etrafımızda, genellikle aşamadığımız bir akvaryum oluşturur.

Ama deneyebiliriz. Bilimkurgu yazarları paralel evrenler ve alternatif gerçeklikler yaratmayı sever; işler orada da buradaki gibi yürür ama arada küçük bir fark var: Buradaki evrenler gerçek! Her bölümde bunlardan birini ziyaret edecek, duyuların en kadim ve evrensel olanıyla, koku ve tat gibi kimyasal duyularla başlayacağız. Oradan beklenmedik bir rota izleyerek, çoğu insanın Umwelt'inde baskın olan ama yine de bolca sürpriz barındıran görme duyusunun diyarını ziyaret edeceğiz. Renkler dünyasının keyfini çıkardıktan sonra, rotamızı ağrı ve

ısı duyularının hırçın sularına doğru çevireceğiz. Dokunma, titreşim ve işitmenin yanı sıra, işitme duyusunun en etkileyici kullanımı olan ekolokasyon gibi basınç ve harekete tepki veren çeşitli mekanik duyuların sularına yelken açacağız. Ardından, hayal gücü artık iyice hazırlıklı ve tecrübeli duyu seyyahları olarak, tuhaf duyuları sayesinde bizim hissedemediğimiz elektriksel ve manyetik alanları saptayan hayvanlara doğru, en zor hayalî sıçrayışımızı yapacağız. Yolculuğumuzun sonunda hayvanların, duyularından gelen enformasyonu nasıl bir araya getirdiğini, insanların bu enformasyonu nasıl kirletip bozduğunu ve doğaya karşı sorumluluklarımızın neler olduğunu göreceğiz.

Marcel Proust'un dediği gibi, "Tek hakiki yolculuk (...) yabancı diyarları ziyaret etmek değil, başkalarının gözlerinden bakarak (...) her birinin gördüğü yüzlerce evreni görmektir."[17] Haydi, başlayalım.

1.

Kimyasal Sızdıran Torbalar

Kokular ve Tatlar

"Buraya daha önce hiç gelmedi yanılmıyorsam," diyor Alexandra Horowitz. "Yani burası onun için epey kokulu olsa gerek."

"O" derken kömür karası Labrador kırması Finnegan'ı (kısaca Finn) kastediyor. "Buraya" derken de New York'ta, köpekler üzerinde psikolojik deneyler yaptığı, penceresiz küçük odayı. "Kokulu" derken odanın tanımadık aromalarla dolu olduğunu ve haliyle Finn'in meraklı burnunun ilgisini çekeceğini anlatmak istiyor. Dediği gibi oluyor. Ben etrafıma bakınırken Finn etrafı kokluyor. Yerdeki matları, masanın üzerindeki klavyeyi ve fareyi, açık duran perdeyi ve sandalyemin altındaki boşluğu dikkatle koklayarak, önce burun delikleriyle keşfediyor. Yeni karşılaştığımız bir manzarayı başımızı ve gözlerimizi hafifçe hareket ettirerek inceleyen biz insanlardan farklı olarak bir köpeğin burnuyla yaptığı araştırma o kadar dolambaçlı yollar izler ki bu hareketler bize gelişigüzel ve amaçsız görünebilir. Ama Horowitz farklı düşünüyor. Finn'in, insanların dokunmuş ve etkileşime girmiş olduğu nesnelerle ilgilendiğini söylüyor. Finn kokuları takip ediyor, diğer köpeklerin bulunduğu yerleri kontrol ediyor. Havalandırmayı, kapı aralığını ve odaya hava akımıyla yeni koku moleküllerinin (odorantlar)* girdiği diğer yerleri inceliyor. Aynı cismin farklı yerlerini ve Horowitz'in ifadesiyle "bir Van Gogh tablosuna yaklaşıp fırça darbelerinin nasıl göründüğünü

* Koku veren maddedeki koku moleküllerine *odorant* denir. Bir odorant olan isoamil asetat muz kokusu verir.

yakından incelermişçesine" farklı mesafelerden kokluyor. "Her an böyle koklayarak araştırma halindeler."

Horowitz köpeklerin koku duyusu alanında uzman[1] ve benim de buraya geliş sebebim, onunla kokuya ve burna dair her şey hakkında konuşmak. Fakat görme benim için o kadar ön planda ki Finn etrafı koklayarak kolaçan ettikten sonra bana yaklaştığı anda kendimi, o koyu kahverengi büyüleyici gözlere bakmaktan alamıyorum.* Dikkatimi yüzünün tam önündeki çıkıntıya, iki deliği yanlara doğru virgül şeklinde kıvrılan ıslak burnuna odaklamak için ciddi bir çaba harcıyorum. Burnu, Finn'in dünyayla arasındaki temel arayüz. Nasıl çalıştığına bakalım.

Derin bir nefes alın (hem uygulama hem de kullanmam gereken terimlere kendinizi hazırlamak için). Nefes aldığınızda hem koku hem de soluk almanızı sağlayan tek bir hava akımı yaratırsınız. Ama bir köpek etrafı koklarken burnundaki yapılar hava akımını ikiye ayırır.[3] Havanın çoğu akciğerlere gider ama bu akımın sadece ve sadece kokular için kullanılan daha küçük bir kolu, burnun gerisinde yoğunlaşır. Burada ince kemik duvarlardan oluşmuş bir labirente girer; duvarlar yapışkan bir tabaka olan koku epiteliyle kaplıdır. İşte kokular ilk olarak burada saptanır. Epitel uzun nöronlarla doludur. Her nöronun bir ucu gelen hava akımına maruz kalır ve geçen koku moleküllerini, koku reseptörleri denen özel bir biçime sahip proteinleri kullanarak yakalar. Nöronun diğer ucuysa doğrudan beynin koku soğancığı denen bölümüne bağlanır. Koku reseptörleri hedeflerini başarıyla yakalayınca nöronlar beyni durumdan haberdar eder ve köpek kokuyu algılar. Şimdi nefesinizi verebilirsiniz.

İnsanlarda da temel mekanizma aynıdır ama köpeklerde her şey daha fazladır:[4] koku epiteli daha geniş, epiteldeki nöronlar onlarca kat fazla ve koku reseptörleri neredeyse iki kat çeşitli, koku soğancığıysa

* Finn'in gözlerinin çekiciliğine kapılmam tesadüf değil. Köpeklerin yüzünde bulunan bir kas, kaşlarının iç tarafını yukarı kaldırarak onlara içli, hüzünlü bir ifade verir. Bu kas kurtlarda bulunmaz. Asırlar süren evcilleştirmenin sonucunda köpeklerin yüzü kasten olmasa da bizimkine biraz daha benzeyecek şekilde yeniden biçimlendi. Artık daha kolay okuyabildiğimiz bu yüzler, korumacı tepkimizi uyarmada daha başarılıdır.[2]

nispeten büyüktür.* Ayrıca onların donanımı ayrı bir kompartımanda bulunur, oysa bizimki burnumuzdan gelen ana hava akımına açıktır. Bu fark çok önemlidir çünkü nefes verirken burnumuzdaki koku moleküllerini dışarı atarız; bu yüzden koklama deneyimimiz iniş çıkışlı ve dalgalıdır. Oysa köpeklerde aksine, koku molekülleri burna girdikten sonra kaldığı ve her koklamayla tazelendiği için bu deneyim daha istikrarlıdır.

Burun deliklerinin biçimi bu etkiyi güçlendirir.[5] Bir köpek yeri koklarken, her nefes verişinde koku moleküllerini burnundan *dışarı* veriyormuş gibi görünebilir. Ama aslında öyle olmaz. Bir köpeğin burnuna dikkatli bakarsanız öndeki deliklerin iki yana doğru birer yarık şeklini aldığını görürsünüz. Hayvan nefes verirken, hava o yarıklardan dışarı çıkar ve dönen bir hava akımı yaratarak taze kokuları burnun *içine* sürükler. Yani köpek nefes verirken dahi havayı emer. Bir deneyde bir İngiliz pointer (ilginç ama köpeğin adı Sör Şeytan'mış) içeri doğru 40 saniye süren kesintisiz bir hava akımı oluşturmuş, hem de bu sırada 30 kez nefes vermiş olmasına rağmen.[6]

Köpek burnunun, böyle bir donanımla inanılmaz derecede hassas olması hiç de şaşırtıcı değil. Evet ama ne kadar hassas? Biliminsanları, belli kimyasallar için köpeklerin koku alabildiği eşik değerleri bulmaya çalışmış olsalar da elde edilen sonuçlar tutarsızdır ve bir deneyden diğerine göre 10 bin değişken faktöre sahiptir.[7†] Bu şüpheli istatistiklere odaklanmak yerine köpeklerin gerçekte neler yapabildiğine bakmak daha öğreticidir. Yapılan deneylerde köpekler tek yumurta ikizlerini kokularından ayırt edebilmişler.[9] Bir çatıda bırakılmış ve bir hafta boyunca açık hava koşullarına maruz kalmış mikroskop lamının üzerindeki tek bir parmak izini saptayabilmişler.[10] Köpekler sadece beş ayak izini

* Bu kıyaslamalarda kesin rakamlar vermekten kasten kaçındım. Tahmini rakamlara ulaşmak kolay olsa da bunların esas kaynaklarını bulmak çok zor. Saatlerce çaba harcadıktan sonra, doğru olmadığı halde tekrarlana tekrarlana doğru kabul edilir hale gelmiş bir bilgi için "For Dummies" (Aptallar İçin) serisinden bir kitabı kaynak gösteren bilimsel bir makaleye ulaşınca varoluşsal bir boşluğa düştüm ve bilginin gerçek doğasını sorguladım. Ne olursa olsun, arada büyük farklılıklar var; mesele bu farklılıkların ne kadar büyük olduğu.

† Bir çalışmada, iki köpek, trilyonda 1 ya da 2 parça amil asetatı (muz kokusu) saptayabilmiş ki bu, insanlardan 10 bin ila 100 bin kat iyi koku aldıkları anlamına gelir.[8] Fakat 26 yıl sonra aynı kimyasalın kullanıldığı, farklı yöntemlerle yapılan deneydeki altı "beagle"dan da 30 ila 20 bin kat iyi oldukları anlamına gelir.

kokladıktan sonra, birinin hangi yöne gittiğini bulabilirler.[11] Köpekler bombaları, uyuşturucuları, mayınları, kayıp insanları, cesetleri, kaçak parayı, trüf mantarlarını, istilacı yabani otları, gizli elektronik cihazları, tarım hastalıklarını, düşük kan şekerini, tahtakurularını, petrol boru hattındaki sızıntıları ve tümörleri saptayabilecek şekilde eğitilmektedirler.

Migaloo, arkeolojik kazılardaki kemikleri bulabiliyor. Pepper, kıyılarda uzun süre devam eden petrol kirliliğini ortaya çıkarabiliyor. Kaptan Ron, kaplumbağa yuvalarını bulup yumurtaların toplanmasına ve korunmasına yardım ediyor. Bear, gizli elektronik cihazların yerini bulabiliyor; Elvis ise hamile kutup ayıları konusunda uzman. Uyuşturucu bulma eğitimi aldığı okuldan fazla enerjik olduğu için atılan Train, artık burnunu jaguar ve dağ aslanı dışkısının izini sürmek için kullanıyor. Tucker, eskiden orka (katil balina) kakası koklamak için teknelerin pruvasında beklerdi; sonra emekli olup görevi Eba'ya devretti. Bir köpek, kokusu olan herhangi bir şeyi bulması için eğitilebilir. Kokuyla ilgili eksikliğimizi telafi etmek için onların Umwelt'lerini kendi gereksinimlerimize göre yeniden yönlendiririz. Koklayarak bulma becerileri hayranlık uyandırıcı olsa da aynı zamanda basit numaralardır. Bu becerilerden ötürü köpeklerin muhteşem koku alma duyusunu takdir ederiz ama bunun, onların iç dünyası için ne anlama geldiğini ya da koku dünyalarının görsel dünyalarından nasıl farklı olduğunu gerçek anlamda kavrayamayız.

Hep düz bir çizgi üzerinde ilerleyen ışıktan farklı olarak kokular etrafa yayılır, sızar, sel gibi boşalır ve havada döner durur. Horowitz, Finn'in yeni bir yer kokladığını izlerken, görme duyusunun kendisine sunduğu keskin sınırları görmezden gelmeye ve "kafasında, hiçbir şeyin net sınırlarının olmadığı, yanardöner bir ortam canlandırmaya" çalıştığını söylüyor. "Odak bölgeleri var ama her şey âdeta birbirinin içine sızıyor," diyor. Kokular köşeleri dönebilir, karanlıkta ve görmeyi zorlaştıran diğer koşullarda yoluna devam edebilir. Horowitz, sandalyemin arkasında asılı duran çantamın içini göremez ama Finn çantanın içini *koklayabilir* ve sandviçten gelen koku moleküllerini burnuyla toplayabilir. Kokular, ışıktan farklı olarak ortamda uzun süre kalır ve geçmişi açığa vurur.* Horowitz'in odasına girip çıkanlar geride hayaletimsi görsel

* Işıkla ilgili aklıma gelen tek istisna var: Bazı deniz solucanları, kalıcı ışığıyla yırtıcı hayvanların dikkatini dağıtan lüminesan kimyasallarla dolu ışıltılı "bombalar" bırakıp kaçabilir.

izler bırakmasalar da Finn onlardan kalan kimyasal izleri saptayabilir. Koku gideceği yere kaynağından önce ulaşabilir, kimin ya da neyin geldiğini haber verir. Uzaklarda yağan yağmurun saldığı kokular yaklaşan fırtınanın habercisi olabilir; eve dönen kişinin yaydığı koku molekülleri, köpeğinin kapıya koşmasına neden olabilir. Bu becerilere bazen duyudışı tanımlaması yakıştırılır ama bunlar basbayağı duyusaldır. Bütün mesele, varlıkların genellikle gözle görülmeden önce burun tarafından hissedilmesidir. Finn koklarken sadece içinde bulunduğumuz ânı değil, geçmişi de okuyor ve geleceği tahmin edebiliyor. Dahası, yaşam öykülerini okuyor. Hayvanlar, havayı koku-molekülü bulutlarıyla dolduran, kimyasal sızdıran torbalardır.* Bazı türler kasıtlı mesajlar göndermek için koku salar ama aslında hepimiz istemeden de olsa aynı şeyi yapıyor, doğru burna sahip canlılara varlığımızı, konumumuzu, kimliğimizi, sağlık durumumuzu ve en son ne yediğimizi açık ediyoruz.†

"Burun üzerinde fazla düşünmemiştim," diyor Horowitz. "Hiç aklıma gelmemişti."‡ Horowitz köpeklerle çalışmaya başlayınca, onların haksızlık karşısındaki tutumlarına odaklanmıştı ki bu, psikologların ilgisini çekebilecek bir konuydu. Fakat Uexküll'ü okuyup Umwelt

---

* Leopar idrarı patlamış mısır gibi kokar. Sarı karıncalar limon kokar. Büyük zahmetler çekerek 131 kurbağa türünü koklamış ve bu çabalarından ötürü Ig Nobel Ödülü kazanmış biliminsanlarının söylediğine göre strese girmiş kurbağalar türüne göre fıstık ezmesi, köri ya da kaju kokabilir.[12] Sorguçlu kafalarıyla komik görünen bıyıklı alkletler, hoş bir mandalina kokusu yayan çok büyük koloniler halinde yaşar.

† Bunun bir istisnası, zehirli bir Afrika yılanı olan şişen engerek olabilir.[13] Şişen engerek haftalarca pusuya yatar ve görsel kamuflajla kendini korur. Ama anlaşılan kimyasal bir kamuflajdan da yararlanır. Ashadee Kay Miller 2015'te köpekler, kuyruksürengiller ve mirketler gibi iyi koku alan hayvanların, üzerinden geçmiş olsalar dahi şişen engereği tespit edemediğini keşfetti. Köpekler, deri değiştirmiş yılanın geride bıraktığı derisinin kokusunu alabilir ama canlı yılanları her nedense tespit edemezler.

‡ Başka biliminsanları da aynı tuzağa düşer. Horowitz, köpek davranışlarıyla ilgili son on yılda yayımlanmış olan bütün çalışmaları çıkardığında, bunların sadece yüzde 4'ünün koku duyusuna odaklandığını buldu.[14] Çalışmaların yalnızca yüzde 17'sinde deney ortamının hava akımı, sıcaklığı, nem düzeyi ya da daha önce mekânda insan veya yiyecek bulunup bulunmadığı gibi bileşenleriyle koku ortamı tanımlanmıştı. Bu, görme duyusuyla ilgilenen araştırmacıların, laboratuvar ışıklarının açık olup olmadığından bahsetmeyi akıl edememesinden farksızdır.

kavramı üzerine düşünmeye başladıktan sonra dikkati, *köpeklerin* de ilgisini çeken koku duyusuna kaydı.

Horowitz, örneğin birçok köpek sahibinin, koklama coşkusunu hayvanlarından esirgediğine dikkat çekiyor. Bir köpek için basit bir yürüyüş, koku duyusuyla yaptığı bir keşif yolculuğudur. Fakat sahibi bunu anlamaz ve yürüyüşü sadece bir egzersiz ya da hedefe giden bir rota olarak düşünürse her koklama eylemi rahatsızlık verici bir soruna dönüşür. Köpek görünmeyen bir izi incelemek için durduğunda sahibi tarafından acele etmeye zorlanır. Kakayı, bir hayvan leşini ya da sahibine nahoş gelen herhangi bir şeyi koklayan köpek çekiştirilerek oradan uzaklaştırılır. Burnunu başka bir köpeğin poposuna yapıştırması uygunsuz bir davranıştır: Seni gidi kötü köpek! Ne de olsa Batı kültürlerinde insanlar birbirini koklamaz.* "Birine sarılabilirsiniz ama onu koklamanız tuhaf kaçar," diyor Horowitz. "Saçınızın harika koktuğunu söyleyebilirim ama samimi değilsek harika *kokuyorsunuz* diyemem." İnsanlar kendi değerlerini –ve kendi Umwelt'lerini– köpeklerine dayatır; onları, koklamak yerine bakmaya zorlayarak koku dünyalarını karartır, köpekliklerinin önemli bir yönünü baskılarlar. Horowitz için bu, hiçbir zaman Finn'i koku tespiti dersine götürdüğü zamanki kadar net olmamıştı.

Tuhaf biçimde bir spor olduğu öne sürülen bu derslerde köpekler, giderek zorlaşan koşullarda, gizli kokuları bulmak üzere eğitilir. Bunun doğuştan gelen bir yetenek olması gerekir ama Finn'in sınıfındaki hayvanların çoğunda öyle değildi. Görünüşe göre bazıları yol yordam bilmiyordu. Sahiplerinin onları kutudan kutuya çekiştirmesi gerekiyordu ya da köpekler ne yapacağını bilmiyordu. Bir kısmı diğer köpeklerden tedirgin olup havlamaya başladı. Fakat yaz boyu aldıkları koklama derslerinden sonra bu tuhaf davranışlar azaldı. Suskun köpekler iradeye kavuştu. Tepkisel köpeklerse artık daha hoşgörülüydü. Hepsi daha munis görünüyordu. Bundan çok etkilenen Horowitz ve meslektaşı Charlotte Duranton, 20 köpekle kendi deneylerini yaptılar. Duranton her hayvan için üç farklı yere kap koydu:[15] Kaplardan biri her zaman mamayla dolu, ikincisi hep boş, üçüncüsüyse bazen dolu bazen boş oluyordu. Köpekler

* 2021'deki Oscar töreninde bir gazeteci Güney Koreli oyuncu Yuh-Jung Youn'a, Brad Pitt'in nasıl koktuğunu sormuştu. Youn, "Onu koklamadım! Ben köpek değilim!" yanıtını vermişti.

mama dolu kaba yaklaşmayı hemen öğrendi; boş olanıysa görmezden geldiler. Peki ya bazen dolu bazen boş olanı? Bir köpeğin *o* kaba yaklaşmaya hevesli olup olmaması bir bilişsel psikoloğun *olumlu yargı yanlılığı*, sıradan insanınsa *iyimserlik* olarak adlandırabileceği duruma işaret ediyordu. Horowitz, köpeklerin hepi topu iki haftalık koku tespit çalışmasından sonra daha iyimser olduğunu gördü. Koku duyuları geliştikçe hayvanların tutumları da değişti. (Buna karşılık, koku ya da otonomiyle ilgisi olmayan, iki haftalık itaat eğitiminden sonra köpeklerde herhangi bir değişim olmadı.)

Bunun Horowitz için anlamı açık: Bırakın, köpek köpekliğini yaşasın. Umwelt'lerinin farklı olduğunu kabul edin ve bu farklılığa saygı duyun. Bu yüzden Horowitz, Finn'i, koku soğancığının paşa gönlü ne çekerse doya doya koklamasına izin verdiği yürüyüşlere çıkarıyor. Finn durunca o da duruyor. Yürüyüş hızını Finn'in burnu tayin ediyor. Daha yavaş yürüyorlar ama zaten Horowitz'in belli bir yere varmak gibi bir derdi olmuyor. Üçümüz böyle bir yürüyüş yapmak için ofisten çıkıp batı yönünde birkaç blok geçtikten sonra Manhattan'daki Riverside Parkı'na giriyoruz. Sıcak bir yaz günü; hava çöp, idrar ve egzoz dumanı kokuyor; bunlar sadece benim alabildiğim kokular. Finn çok daha fazla koku alıyor. Burnunu kaldırımdaki çatlaklarda gezdiriyor. Bir trafik işaretini inceliyor. Bir yangın musluğunu koklamak için duruyor çünkü Horowitz'in söylediğine göre musluğu "Columbia Üniversitesi'ndeki tüm köpekler ziyaret etmiş." Horowitz bazen, taze idrarla ıslanmış bir toprak parçasını koklayan Finn'in başını kaldırıp etrafına bakınarak (ya da etrafını koklayarak) az önce oraya kokusunu bırakan köpeği bulduğunu görüyor. Koku sadece kendine has nitelikleri olan bir şey değil, aynı zamanda bir referans noktası; yürüyüş ise sadece A ve B noktaları arasındaki bir ara durum değil, aynı zamanda Manhattan'ın görünmez, katmanlı hikâyeleri arasında yaptığımız bir tur.

Parka girince havayı yeşillik, yeni biçilmiş çim, malç ve ızgara kokusu sarıyor. Yanımızdan bir köpek geçiyor ve Finn dönüp puro içen biri gibi peş peşe güçlü nefesler alarak koku örneğini içine çekiyor. İki iri kaniş bize doğru geliyor ama yanımıza yaklaşmalarına fırsat kalmadan köpeklerin sahibi tasmalarından çekip bir çitin önünde kendini onlara siper ediyor. Horowitz üzgün görünüyor. Dişi bir Avustralya

çoban köpeği gelip Finn'in etrafında dönmeye başlayınca, sahibiyle ayaküstü sohbet ediyoruz; iki köpek birbirinin cinsel organını hevesle koklamaya koyulunca Horowitz'in keyfi yerine geliyor. Biz köpeğin cinsiyetini sahibinin kullandığı zamirlerden anlıyoruz; Finn'se hayvanın kokusundan. Biz köpeğin yaşını soruyoruz; Finn'se tahmin edebiliyor. Sağlık durumunu ya da çiftleşme döneminde olup olmadığını sormuyoruz; Finn'in sormasına gerek yok zaten. "Bir ara ben de onun kokladığını koklamaya çalışıyordum ama onun aldığı kokuları alamadığımı bildiğimden bunu giderek daha az yapıyorum," diyor Horowitz. Ama insanın kendini geliştirmesi mümkün. İnsan burnu anatomik açıdan köpeğinki kadar karmaşık değil ve yerden uzak olması işleri daha da zorlaştırıyor; ayrıca burnumuzu gerektiği kadar kullanmıyoruz. Horowitz, daha fazla koklayarak ve kokulara daha fazla dikkat ederek daha iyi bir koklayıcıya (ve sosyal açıdan daha garip bir tipe) dönüştüğünü söylüyor. "Mükemmel burunlara sahibiz. Ama burnumuzu köpekler kadar iyi kullanmıyoruz."

İnsandaki koku duyusunu inceleyen nörobilimcilere köpeklerden bahsettiğinizde, Horowitz'in, kitabı *Being a Dog*'u yazarken fark ettiği gibi, komik bir şey olur. Alanlarını korumaya çalışır ve biraz da... nasıl desem... burnu havada davranırlar. Bazıları, sıçanlar (mayınların yerini tespit edebilirler), domuzlar (koku epitelleri, bir Alman çoban köpeğininkinin iki katı kadar geniş olabilir) ve filler (bu konuya daha sonra geleceğiz) gibi mükemmel koku alan başka memeliler olduğu halde köpeklere, koku duyusunun kusursuz örnekleri olarak muamele edilmesinden rahatsız olur. Bazılarıysa köpeklerin belli kokuları tespit etme becerisini sınayan çalışmalarda çok büyük tutarsızlıklar olduğuna dikkat çeker.[16] Çeşitli sonuçlara göre, köpeklerin insanlardan bir milyar ya da bir milyon veya sadece on bin kat hassas olduğu iddia edilir. Bazı sonuçlara göreyse insanlar *daha hassastır*:[17] İki türün de 15 koku molekülüyle sınandığı deneylerde, beta-iyonon (sedir ağacı kokusu) ve amil asetat (muz kokusu) dahil beş kokuda insanlar köpek dostlarımızı geride bırakmıştır. İnsanlar kokuları ayırt etmede de son derece başarılıdır. İnsanların birbirinden ayırt edemediği iki renk bulmak kolaydır ama ayırt edilemeyen koku çiftleri bulmak çok zordur. Bunu denemiş

olan nörobilimci John McGann "*Farelerin* dahi ayırt edemediği kokuları denedik ve insanlarda sonuç başarılıydı," diyor.

Ne var ki bu alanda yazılmış klasik kitaplar hâlâ koku duyumuzun berbat olduğunu iddia etmektedir. McGann bu tehlikeli mitin izini on dokuzuncu yüzyıla dek sürmüş.[18] 1879'da nörobilimci Paul Broca, koku soğancığımızın, diğer memelilerinkine göre cılız kaldığını fark etmişti. Kokunun temel ve hayvansal bir duyu olduğu, kaybınınsa gelişmiş bir düşünce yapısına ve özgür iradeye sahip olmamız için gerekli olduğu sonucuna vardı. Bizi diğer primatlar ve balinalarla birlikte koklamayanlar olarak sınıflandırdı. Bu etiket üstümüze yapışıp kaldı; oysa Broca aslında hiç ölçüm yapmadan, beyinlerinin boyutlarına dayanarak, hayvanların ne kadar iyi koklaığına dair bazı kaba çıkarımlar yapmıştı. Fareyle karşılaştırıldığında, insanda koku soğancığı beynin diğer bölümlerine göre daha küçük olsa da fiziksel olarak daha büyüktür ve kabaca aynı sayıda nöron içerir. Bu ölçümlerin bir hayvanın koku deneyimi hakkında bize ne gösterdiği belirsizdir.*

Klasik kitaplar da kokunun uzun zamandır hak ettiği değeri görmediği kültürlere dayalı Batılı bakış açısını yansıtır. Platon ve Aristoteles, koku duyusunun, duygusal izlenimlerden başka bir şey oluşturamayacak denli belirsiz ve bozuk yapıda olduğunu savunuyorlardı. Darwin ise bu duyunun "son derece küçük bir hizmette" bulunduğunu varsaymıştı.[20] Kant'a göreyse "koku kendisinin tanımlanmasına izin vermez, sadece bir başka duyuyla benzerliği açısından karşılaştırılabilir."[21] İngilizce, kokunun niteliğini tanımlayan sadece üç sözcük içeren bir dil olması bakımından Kant'ın bakış açısını doğrular:[22] *stinky* (pis kokulu), *fragrant* (hoş kokulu) ve *musty* (küflü). Diğer sözcüklerin hepsi, bu üç sözcüğün eşanlamlısı (*aromatic, foul* gibi) ya da başka bir duyudan ödünç alınmış (tatlı anlamına gelen *sweet* ve baharatlı anlamına gelen *spicy* gibi) yahut gül veya limon kokusunda olduğu gibi kokunun kaynağını tanımlayan sözcüklerdir. Aristoteles'in tanımladığı beş duyudan dördünün geniş ve kendine has bir sözcük envanteri vardır. Diane Ackerman'ın da yazdığı gibi, koku duyusu, "sözcükleri olmayan duyu"dur.[23]

* Koku soğancığı, koku duyusu için gerekli bile olmayabilir. 2019'da Tali Weiss, bu yapının bulunmadığı ama koklama sorunu olmayan birkaç kadın tanımladı.[19] Bu kadınların nasıl koku alabildiğini bilmiyoruz.

Malezya'da yaşayan Jahai halkı buna itiraz edecektir[24] zira Semaq Beri ve Maniq gibi avcı-toplayıcı grupların kokular için özel bir kelime dağarcığı vardır. Jahailer sadece kokular ve koklama için bir düzine sözcük kullanır. Bunlardan biri benzin, yarasa dışkısı ve kırkayak kokusunu tanımlar. Bir diğeri karides ezmesi, kauçuk ağacının özsuyu, kaplan ve kokuşmuş et kokusunu tarif eder. Bir başka sözcükse sabun, keskin kokulu durian meyvesi ve binturongun patlamış mısıra benzer kokusunu tanımlar.* İngilizce konuşanların renkleri kolayca adlandırmasına benzer şekilde Jahailerin de kokuları adlandırabildiğini keşfeden psikolog Asifa Majid "Kokular hakkında konuşmak onlar için bu kadar kolay," diyor. Domates nasıl kırmızıysa binturong de [Jahai dilinde] *itpit*'tir. Koku aynı zamanda kültürlerinin temel parçasıdır. Bir keresinde Jahailer, araştırmacı arkadaşına fazla yakın oturan Majid'i, kokuları birbirine karıştığı için azarlamışlar. Yabani zencefilin kokusunu tanımlamaya çalıştığında, yalnızca kokuyu adlandıramadığı için değil, sapı ve çiçekleri *açıkça* farklı kokan bitkiye tek bir nesneymiş gibi davrandığı için de çocuklar Majid'le dalga geçmişler. Majid, "Dikkate alınanlar, Britanyalılar ya da Amerikalılar değil Jahailer olsaydı insanın koku duyusunun zayıf olduğu efsanesi geçerliliğini çoktan yitirmiş olurdu," diyor.

Fırsat verildiğinde Batılılar bile şaşırtıcı koku alma becerileri sergileyebilir. 2006'da nörobilimci Jess Porter, gözü bağlı öğrencileri Berkeley'de bir parka götürüp çimlerin üstüne 10 metre boyunca serptiği kakao yağının izini sürmelerini istedi.[25] Öğrenciler köpek gibi dört ayak üstünde etrafı koklamaya başladı. Komik görünüyorlardı. Ama başardılar ve pratik yaptıkça daha da iyi oldular.

Alexandra Horowitz aynı testi bana da uygulamak için yere çikolata kokan bir ip seriyor. Gözlerim kapalı, burnum açık, dört ayak üzerinde etrafı kokluyorum. Çikolata kokusunu aldığım gibi izini sürüyorum. Kokuyu kaybedince başımı tam bir köpek gibi sağa sola çeviriyorum. Ama benzerlikler burada sona eriyor. Bir köpek saniyede altı kez koklayarak koku reseptörlerine devamlı hava taşır. Art arda defalarca hızlı hızlı nefes aldıktan sonra nefes vermek için durduğum anda kokunun

* Binturong 2 metre uzunluğunda; kedi, gelincik, ayı karışımı gibi görünen, siyah, kaba tüylü bir hayvandır. Ayıkedisi adıyla da bilinir; ilk kitabım *Mikrobiyota*'da da kısacık bir rolü vardı.

izini kaybediyorum. İpin izini bulmayı başarıyorum ama Finn'in yarım saniyede yaptığını yapmam bir dakika sürüyor. Düzenli pratik yapsaydım bile onun hızına yaklaşamazdım çünkü gerekli donanıma sahip değilim. Ve en önemlisi, diyor Horowitz ipi kaldırırken, bir köpek kaynağı gittikten sonra bile kokunun izini sürebilir. İkimiz de eğilip koklamaya başlıyoruz. "Geride kalmış bir koku almıyorum," diyor Horowitz. İnsanların koku duyusunu hafife alıyoruz ama bir köpeğin koku dünyasında yaşamadığımız da açık. Bu dünya öylesine karmaşıktır ki onu anlamlandırabilmemiz bile bir mucize.

Çoğu canlı ışığı algılayabilir. Bazıları sese tepki verebilir. Az sayıda canlıysa elektriksel ve manyetik alanları tespit edebilir. Fakat belki de istisnasız bütün canlılar kimyasalları saptayabilir. Tek bir hücreden oluşan bir bakteri bile dış dünyadaki moleküler ipuçlarını yakalayarak besin bulabilir ve tehlikeden sakınabilir. Bakteriler ayrıca kimyasal sinyalleri yoluyla aralarında iletişim kurar, enfeksiyonlara neden olur ve sadece yeterli sayıya ulaştıklarında başlatabilecekleri diğer eşgüdümlü eylemleri gerçekleştirirler. Bu sinyaller, bakteri öldüren virüsler tarafından saptanıp kullanılabilir;[26] virüsler, canlı olup olmadığına dahi karar veremediğimiz basit varlıklar olmalarına rağmen kimyasal duyuya sahiptir. O halde kimyasallar, duyusal anlamda en kadim ve evrensel bilgilerdir.[27] Umwelt'ler var olalı beri, kimyasallar onların parçası olmuştur; hem de anlaşılması en zor parçalardan biri.

Görme ve duyma üzerine çalışan biliminsanlarının işi nispeten kolaydır. Işık, parlaklık ve dalgaboyu, ses ise gürlük ve frekans gibi açık ve ölçülebilir özelliklerle tanımlanabilir. Gözüme 480 nanometre dalgaboyunda ışık tutarsanız mavi görürüm. Frekansı 261 hertz (Hz) olan bir nota söylerseniz do notasını duyarım. Oysa kokular âleminde böylesi bir öngörülebilirliğe rastlanmaz. Olası koku moleküllerinin çeşitliliği sonsuz denebilecek kadar fazladır.[28] Biliminsanları kokuları sınıflamak için yoğunluk ve hoşa gidebilirlik gibi sadece insanlara sorarak ölçülebilen, öznel kavramlar kullanır. Daha da kötüsü, kimyasal yapısına bakarak bir molekülün nasıl koktuğunu –hatta kokusu olup olmadığını– tahmin

etmek mümkün değildir.* Buna rağmen birçok hayvan, kimya ya da nörobilim alanında herhangi bir eğitim görmediği halde koku almanın karmaşıklığıyla boğuşmakta doğuştan yeteneklidir. Burunları sonsuz boşluğun krallarıdır.[31] Peki, bu burunlar nasıl çalışır?

Temel mekanizma, Linda Buck ile Richard Axel'ın 1991'de yaptığı çok önemli bir keşifle açıklığa kavuştu. Kendilerine Nobel Ödülü kazandıran bu çalışmada[32] ikili, koku moleküllerini tanıyan proteinler olan koku reseptörlerini üreten büyük bir gen grubu tanımladı.† Bu bölümde daha önce köpeklerden söz ederken karşılaştığımız reseptörler aslında bütün hayvanlar âleminde koku duyusunda rol oynar. Koku reseptörleri, hedef moleküllerini, muhtemelen bir elektrik fişi ile priz arasındaki uyuma benzer bir ilişkiyle tanır.‡ Sonrasında bu reseptörleri taşıyan nöronlar beyindeki koku merkezlerine sinyaller gönderir ve hayvan bir koku algılar. Fakat bu sürecin ayrıntıları hâlâ belirsizdir.

---

* Burnunuzu benzaldehide sokmadan onun badem gibi koktuğunu tahmin edemezsiniz. Bir sayfada dimetil sülfidin kimyasal yapısının çizimini görseydiniz deniz koktuğunu düşünmezdiniz. Birbirine benzeyen moleküller bile son derece farklı kokular üretebilir. Yedi karbonlu bir omurgası olan heptanol, otsu ve yapraksı kokar. Zincire bir karbon daha eklerseniz elde edeceğiniz oktanol ise limon kokar. Karvon, karbon sayısı aynı ama birbirinin ayna görüntüsü olan iki farklı biçimde bulunur: Bunlardan biri kimyon, diğeriyse nane kokar. Karışımlar daha da kafa karıştırıcıdır. Bazı koku çiftlerinin kokusu karıştırıldığında dahi ayrı ayrı alınır; bazılarındaysa iki ana kokudan farklı üçüncü bir koku oluşur.[29] Yüzlerce kimyasal içeren parfümlerin kokusu, münferit koku moleküllerininkinden daha karmaşık değildir ve insanlar bir karışımın bileşimindeki üç kokudan fazlasını adlandırmakta zorlanır. Koku duyusu üzerine çalışan nörobiyolog Noam Sobel, bu karmaşık durumu kavramaya herkesten daha fazla yaklaşmıştır.[30] Ben bu kitabı yazarken Sobel ve ekibi, koku moleküllerinin 21 özelliğini analiz edip tek bir sayıya indirgeyen bir ölçüm geliştirdiler. Herhangi iki molekülde bu ölçümün sonuçları birbirine ne kadar yakınsa kokular da o kadar benzerdir. Bu, molekül yapısına göre kokuyu öngörmekle aynı şey değil gerçi ama diğer kokularla benzerliğinden yola çıkarak kokuyu tahmin etmek, yapılabilecek en iyi ikinci şey.

† Terminoloji kafa karıştırıcıdır. Duyu biyolojisinde *reseptör* sözcüğü genellikle bir duyu hücresini tanımlamak için kullanılır (fotoreseptör ya da kemoreseptör gibi). Koku reseptörleriyse duyu hücrelerin yüzeyindeki proteinlerdir. Benim suçum değil; kuralları ben koymadım.

‡ Kokuların farklı moleküllerin titreşimlerinde kodlanmış olduğunu savunan popüler kuram çürütülmüştür.[33]

Büyük çeşitlilik gösteren koku moleküllerinin hepsini ayrı ayrı tanıyacak sayıda reseptör olmadığına göre, koku algısı, koku nöronlarının belli bir tertip çerçevesinde ateşlenmesine bağlı olsa gerek. Bir grup nöron ateşlendiğinde gül kokusuyla kendinizden geçersiniz. Bir başka grup etkinleştiğindeyse kötü bir kusmuk kokusuyla irkilirsiniz. Böyle bir kod var olmalı ama bu kodun işleyişi gizemini hâlâ büyük ölçüde koruyor.

Koku reseptörleri bireyler arasında da çarpıcı bir değişkenlik gösterir. Örneğin OR_7D_4 geni, terli çorapların ve vücut kokusunun altında yatan androstenon kimyasalına yanıt veren bir reseptör oluşturur.[34] Çoğu kişi bu kokuyu itici bulur. Fakat OR_7D_4'ün farklı bir biçimini taşıyan az sayıda şanslı kişiye androstenon *vanilya* gibi kokar. Bu, çeşitli biçimleri olan ve her bireyin kendi kişisel Umwelt'ini yaratan yüzlerce reseptörden sadece bir tanesidir. Muhtemelen hepimiz dünyayı az çok farklı kokluyoruz. Bir başka insanın Umwelt'ini anlamak bu kadar zorsa bir başka türünkini anlamanın ne denli güç olduğunu varın siz düşünün.

Bir hayvanın koku duyusunu bir başkasınınkiyle yarıştıran herhangi bir iddiaya temkinli yaklaşmak gerek. Fillerin koku duyusunun kan tazısınınkinden beş kat hassas olduğunu kaç yerde okudum ama bunun hiçbir anlamı yok. Beş kat hassas derken kastedilen şey, filin beş kat fazla kimyasal saptadığı mıdır? Yoksa belli kimyasalların kokusunu, beşte bir oranındayken ya da beş kat uzak mesafeden aldığı mı? Veya kokuları anımsadığı sürenin beş kat uzun olduğu mu? Bu tür karşılaştırmalar her zaman merak ve hayret uyandırır çünkü kokular çok çeşitlidir ve çoğu zaman sayısal olarak ifade edilemez. "Bir hayvanın koku duyusu ne kadar iyi?" sorusunu sormaktan vazgeçmeliyiz. Daha iyisi, "Koku o hayvan için ne kadar önemli?" ya da "Hayvan koku duyusunu ne için kullanıyor?" sorularını sormaktır.

Sözgelimi erkek güveler, dişilerin yaydığı cinsel kimyasallara karşı hassastır.[35] Bu koku moleküllerini tüylü antenleriyle kilometrelerce uzaktan ayırt ederek kaynağına doğru yavaş yavaş kanat çırparlar. Koku onlar için o kadar önemlidir ki biliminsanları dişi atmaca güvelerinin antenlerini erkeklere naklettiklerinde, alıcılar eş kokusu yerine dişiler gibi yumurtlayacak yer kokusu aramaya başlamıştır.[36] Bu hayvanların koku duyusunun inanılmaz olduğu aşikâr ve hâlâ var olmaları

da bunun delili. Ne var ki bu inanılmaz duyudan sadece birkaç özel iş için faydalanırlar. Güveler için "kokuyla yönlenen dronlar" tanımlaması abartı olmaz.[37] Çoğu ergin erkeğin beslenme organı bile yoktur. Beslenme ihtiyacından azade erkeklerin kısacık ömrü uçmaya, bulmaya ve çiftleşmeye adanmıştır. Davranışları o kadar basittir ki kolayca yolundan saptırılabilir. Bolas örümceği dişi güvelerin kokularını taklit ederek erkekleri pusuya düşürüp öldürür; çiftçilerse onları bu kokularla kandırıp tuzağa düşürür.[38] Fakat diğer böceklerde kokular daha incelikli yollardan işlenir.

New York'ta, bir laboratuvardayız. Leonora Olivos Cisneros, bir plastik kabın kapağını açıp kımıl kımıl bir yığın koyu kızıl noktayı serbest bırakıyor. Bu kızıl noktalar birer karınca. Klonal akıncılar olarak adlandırılan ve iyi bilinmeyen bu tür, çoğu karıncaya göre daha tıknazdır ve ne gariptir ki kolonide bir kraliçe ya da erkek bireyler yoktur. Hepsi dişidir ve kendilerini klonlayarak çoğalabilirler. On bin civarında karınca plastik kabın etrafında koşuşuyor. Çoğu kendi bedenini geçici bir yuvaya dönüştürmüş, yavrularıyla ilgileniyor. Geri kalanlarsa etrafta dolanarak yiyecek arıyor. Olivos Cisneros bu karıncaları, başka karıncalarla besliyor; menüde Meksika'dan getirttiği, çok daha büyük bir karınca türünün larvalarından yapılan *escamoles** de var.

Klonal akıncılar o kadar küçükler ki içlerinden birine odaklanmak zor. Onları mikroskop altında görmek daha kolay; sadece daha büyük göründükleri için değil, Olivos Cisneros onları boyamış olduğu için. Tecrübeli elleriyle karıncaların sırtına böcek iğneleri kullanarak sarı, turuncu, fuşya rengi, mavi ve yeşil boyalar sürüp her birine otomatik bir kamera sistemiyle izlenebilen benzersiz bir renk kodu veriyor. Renkler aynı zamanda karıncaların çıplak gözle daha kolay gözlemlenmesini sağlıyor. Ara sıra karıncalardan birinin, uca doğru genişleyen antenleriyle başka bir karıncayı yokladığı dikkatimi çekiyor. Antenle dokunma, koklamanın karıncalardaki eşdeğeridir. Bu şekilde birbirlerinin vücudundaki kimyasalları inceleyerek kendi kolonilerinden olan bireyleri yuvaya izinsiz giren yabancılardan ayırt ederler. Normalde

* Meksika havyarı olarak da bilinen ve Aztekler döneminden beri Meksika'da tüketilen bir yiyecek. (*ç.n.*)

yeraltında yaşayan bu karıncalar kördür. "Görsel açıdan olan biten bir şey yok," diyor laboratuvar yöneticisi Daniel Kronauer. "İletişimleri bütünüyle kimyasal."

Kullandıkları kimyasallara feromon denir;[39] bu önemli terim sıklıkla yanlış anlaşılır. Feromonlar, *aynı türün* bireyleri arasında mesaj taşıyan kimyasal sinyallerdir. Dişi güvelerin erkekleri çekmek için kullandığı bombikol bir feromondur ama sivrisinekleri vücuduma çeken karbondioksit feromon değildir. Ayrıca feromonlar, kullanımı ve anlamı belli bir türün bireyleri arasında değişmeyen, *standart mesajlardır.* Bütün dişi ipekböcekleri bombikol kullanır ve bütün erkekler onun çekim gücüne kapılır. Birinin kokusunu bir başkasınınkinden farklı kılan kimyasallar feromon *değildir.* Hatta bekârların birbirlerinin giysilerini koklayıp durduğu feromon partilerine ya da afrodizyak olarak pazarlanan feromon spreylerine rağmen, insanlarda feromonların olup olmadığı bile kesin değil.[40] Yıllar süren araştırmalar sonucunda tek bir insan feromonu dahi tanımlanmamıştır.*

Karınca feromonlarındaysa durum farklıdır.[42] Karıncalar birçok feromonu özelliklerine göre farklı amaçlarla kullanır. Sözgelimi kolayca havaya karışan hafif kimyasallar, ava hızla üşüşebilen işçileri toplamak amacıyla ya da hızlı yayılan alarm çağrıları olarak kullanılır. Bir karıncanın başını ezerseniz kolonideki arkadaşları saniyeler içinde havaya karışan feromonları algılar ve mücadele etmeye hazırlanır. Havaya daha yavaş karışan orta ağırlıktaki kimyasallar, izleri işaretlemede kullanılır. Besin bulan işçilerin geride bıraktığı bu feromonlar, kolonideki diğer karıncaları besin kaynağına yönlendirir. Ne kadar çok işçi gelirse

* İnsan feromonları muhtemelen var ama onları bulmak başlı başına bir iş.[41] Araştırmacılar hayvanlarda bir feromona verilen tepkiyi incelerken, üst dudağı yukarı doğru kıvırma (Flehmen tepkisi), antenlerle ses çıkarma gibi basmakalıp davranışlara ya da testosteron düzeyinin artması gibi fizyolojik tepkilere bakar. Ama insanlar o kadar çeşitli ve karmaşıktır ki eylemlerimizin pek azı belli bir çerçeveye uyar. Bir zamanlar bazı araştırmacılar, birlikte yaşayan kadınlarda âdet döngüsünün tanımlanmamış bir feromonun etkisiyle eşzamanlı hale geldiğinden şüpheleniyordu ama bu da bir efsaneden ibarettir. Şimdi de memeden, bebeği emmeye teşvik eden bir feromonun salgılanıyor olabileceğini düşünenler var ama şimdiye dek böyle bir kimyasal ayrıştırılmadı.

iz o kadar güçlenir. Besin tükenince iz de yavaş yavaş silinir. Yaprak kesici karıncalar iz feromonuna o kadar duyarlıdır ki bu kimyasalın bir miligramı gezegenin etrafını üç kez dolaşabilecekleri uzunlukta bir hat oluşturmaya yeter.[43] Son olarak, havaya pek az karışan en ağır kimyasallar karınca vücudunun yüzeyinde bulunur. Kütiküler hidrokarbonlar olarak bilinen bu maddeler kimlik kartı işlevi görür.[44] Karıncalar bu kimyasalları, kendi türlerini başka karınca çeşitlerinden, yuvadaki arkadaşlarını diğer kolonilerden ve kraliçeleri işçilerden ayırt etmek için kullanır. Kraliçelerse aynı maddeleri işçilerin üremesini durdurmak ya da asileri cezalandırmak için kullanır.[45]

Feromonlar karıncalar üzerinde öyle büyük bir etki gösterir ki karıncaların, ilgili başka duyusal ipuçları olmasa da tuhaf ve kendilerine zarar verecek şekilde davranmalarına yol açabilir. Kırmızı karıncalar, karınca larvalarına hiç benzemeyen ama tam olarak onlar gibi *kokan* mavi kelebek tırtıllarının bakımını üstlenir.[46] Ordu karıncaları[47] feromon izlerini öylesine büyük bir sadakatle takip eder ki bu izler kazara daire çizip başa dönerse yüzlerce işçi karınca yorgunluktan ölene dek sonsuz bir "ölüm sarmalı"nda döner durur.* Birçok karınca, feromonları kullanarak ölü bireyleri ayırt eder:[49] Biyolog E. O. Wilson, canlı karıncaların üzerine oleik asit sürdüğünde, kız kardeşleri karıncalara ceset muamelesi yapıp onları koloninin çöp yığınlarına taşımıştı. Karıncanın canlı olmasının ve gözle görülür biçimde çırpınmasının bir önemi yoktu. Önemli olan, ölü gibi *kokuyor* olmasıydı.

"Karıncaların dünyası, feromon alışverişi yapılan gürültülü bir kargaşa ortamıdır," diyor Wilson.[50] "Biz bunu görmüyoruz tabii. Bu küçük kırmızı yaratıkların oradan oraya koşuşmasından başka bir şey görmüyoruz ama aslında altta muazzam bir faaliyet, eşgüdüm ve iletişim yatıyor." Bunların hepsi feromonlara bağlı. Bu kokulu maddeler sayesinde karıncalar bireyselliğin sınırlarını aşıp basit bireylerin şuursuz eylemlerinden karmaşık ve aşkın davranışlar sergileyen bir süperorganizmaya

* Eylül 2020'de, ordu karıncalarının ölüm sarmalının, ABD'nin COVID-19 pandemisine verdiği tepki için mükemmel bir metafor olduğunu fark ettim: "Karıncalar, burunlarının dibinde olanın ötesindeki büyük resmi algılayamaz. Kendi emniyetlerini sağlayacak eşgüdümden yoksundurlar. İçgüdülerinin esiri olmuşlardır."[48]

dönüşür. Böylece ordu karıncaları önüne geçilemez yırtıcılar gibi davranabilir: Arjantin karıncaları kilometrelerce uzunlukta süperkoloniler oluşturabilir, yaprak kesici karıncalar kendine has bir yöntemle mantar yetiştirerek tarım yapabilir. Karınca uygarlıkları, Dünya üzerindeki en etkileyici uygarlıklar arasında yer alır ve karınca araştırmacısı Patrizia d'Ettore'nin de yazdığı gibi, "dehaları kesinlikle antenlerindedir."[51]

Kronauer'ın klonal akıncı karıncalar üzerine yaptığı araştırmalar bu dehanın nasıl evrilmiş olabileceğini gösteriyor. Karıncalar aslında 140 ila 168 milyon yıl önce eşekarısı benzeri atalarından ayrılarak evrildi ve tek başına yaşamdan ileri düzeyde sosyal bir yaşama hızla geçtiler.[52] Bu süreçte, kokulu kimyasalları algılamalarını sağlayan koku reseptörü genleri repertuarı büyük ölçüde genişledi.[53] Meyve sineklerinde bu genlerden 60, balarılarında 140 tane varken karıncaların çoğu 300 ila 400 gen taşır; klonal akıncıysa 500 genle rekoru elinde tutar.* Peki, neden? İşte size üç ipucu:[54] Birincisi, klonal akıncıların üçte birinin koku reseptörleri sadece antenlerinin altında, yani birbirlerine dokundukları yerlerde üretilir. İkincisi, bu reseptörler özellikle karıncaların kimlik kartı olarak taşıdıkları ağır feromonları tespit eder. Üçüncüsü, 180 civarında reseptörün hepsi yaklaşık olarak, karıncaların yalnız yaşayan atalarının koloniler halinde yaşamaya başladığı dönemde, tek bir genin defalarca ikilenmeye (duplikasyon) uğramasıyla ortaya çıktı. Bu ipuçlarını bir araya getiren Kronauer, bütün bu fazladan koku donanımının, karıncaların yuva arkadaşlarını daha iyi tanımalarına katkı sağlamış olabileceği sonucuna varıyor. Ne de olsa karıncalar *belli bir* feromonun olup olmadığına bakmakla kalmaz, yirmi otuz feromonun nispi oranlarını da tartarlar. Bu zor bir hesap işi olmakla beraber karıncaların yaptığı diğer her şeyin temelini oluşturur. Karıncalar koku duyularını güçlendirerek karmaşık topluluklarını düzenlemenin yolunu bulmuştur.

Karıncaların kokuya ne kadar bel bağladığı, özellikle bu duyuyla bağlantıları koparıldığında belli olur. Kronauer, klonal akıncıları, koku reseptörlerinin hedef molekülleri saptaması için gereken *orco* geninden yoksun bıraktığında, mutant karıncalar karıncavari olmayan davranışlar

* Bir uyarı: Bir hayvanın duyusal yetilerini gen sayısına göre değerlendirmek tehlikelidir. Köpeklerde iş gören koku reseptörlerinin sayısı insanlardakinin iki katıdır ama bu, koku duyularının iki kat iyi olduğu anlamına gelmez.

sergilediler.[55] "Bu karıncalarda daha en başından bir sorun vardı," diyor Olivos Cisneros. "Ayan beyan ortadaydı." Feromon izlerini takip etmiyorlardı. Yoğun kokularıyla normal karıncaları uzak tutan engellere, örneğin keçeli kalemle çizilmiş çizgilere aldırmıyorlardı. Bakmakla yükümlü oldukları larvaları umursamıyorlardı. Hatta kolonilerini hepten yok sayıyor, bazen günlerce kendi başlarına takılıyorlardı. Kazara bir koloniye düştüklerinde, varlıkları diğerlerini rahatsız ediyordu. Bazen uyarı olmadığı halde alarm feromonları yayıyor, yuva arkadaşlarının yok yere telaşa kapılmasına neden oluyorlardı. "Orada başka karıncalar da olduğunu anlayamazlar," diyor Kronauer. "Onları hiçbir şekilde algılayamazlar." Bu karıncalar için üzülmemek elde değil. Koku duyusu olmayan bir karınca, kolonisiz kalmış bir karıncadır ve kolonisiz kalmış bir karınca, karıncadan bile sayılmaz.*

Karıncalar feromonların gücünü gösteren belki de en çarpıcı örnektir ama başka örnekler de var. Dişi ıstakozlar seks feromonuyla cezbetmek için erkek ıstakozların yüzüne işer.[57] Erkek farelerin idrarında, dişilerin, kokunun diğer bileşenlerine özellikle ilgi duymasını sağlayan bir feromon bulunur; bu maddeye *Gurur ve Önyargı* romanının erkek kahramanından esinlenerek *darsin* adı verilmiştir.[58] Örümcek orkidesi, erkek arıları, cinsel feromonlarını taklit ederek polenlerini taşıtmak için kandırır.[59] E. O. Wilson, "Her an ve özellikle de doğada, büyük feromon bulutları içinde yaşıyoruz," demişti. "Gramın milyonda biri kadar feromon, köpük köpük yayılarak belki bir kilometre yol katedebilir."[60] Duruma ve türe özel bu mesajlar, en küçüğünden en büyüğüne bütün hayvanlar âlemini yönlendirir.

Lucy Bates 2005'te filleri araştırmak için Kenya'daki Amboseli Ulusal Parkı'na gelmişti. Tecrübeli asistanları, araziye çıktığı ilk gün, biliminsanlarının 1970'lerden beri gözlemlediği bu hayvanların, araştırma grubuna yeni birinin katıldığını muhakkak anlayacağını söylemişlerdi. Bates şüpheciydi. Nereden bileceklerdi? Niye umurlarında olacaktı ki? Fakat

* Bunun bir emsali var. İsviçreli biliminsanı Auguste Forel, 1874'te bir karıncanın ana koku organının antenleri olduğunu gösterdi. Antenlerini kopardığı zaman karıncalar yuva yapamaz, yavrularına bakamaz ya da diğer kolonilerden gelen yabancılara saldıramaz hale geldi.[56]

bir fil sürüsü bulup aracı durdurur durdurmaz, filler ekibe doğru döndü. "İçlerinden biri bize yaklaştı, hortumunu penceremden uzatıp içeriyi iyice kokladı," diye anlatıyor Bates. "İçeride yeni biri olduğunu biliyorlardı."

Sonraki birkaç yıl boyunca Bates, fillerle zaman geçiren herkesin bildiği bir şeyi anladı: Fillerin yaşamında koku duyusu hâkimdir. Bunu anlamak için bir filin rekor düzeydeki 2 bin koku reseptörünü içeren gen kataloğunu ya da koku soğancığının büyüklüğünü bilmeniz gerekmez.[61] Hortumunu seyretmeniz yeterli. Başka hiçbir hayvanın bu denli hareketli ve dikkat çekici bir burnu yoktur; o nedenle hiçbir hayvanın koklamasını seyretmek bu kadar kolay değildir. Bir fil yürüyor ya da besleniyorken, tetikte veya gevşemişken, hortumu devamlı hareket eder, sallanır, kıvrılıp bükülür, etrafı tarar ve hisseder. 180 santimetre uzunluğundaki bu organ bazen bir cismi periskop gibi inceler. Hareketleri bazen çok belli belirsizdir. "Yemek yiyen bir file yaklaştığınızda, gelişinizi duyduğu an başını bile çevirmeden, sadece hortumunun ucunu size doğru sallayabilir," diyor Bates.

Afrika fili, en sevdiği bitkileri, kapalı kutulara saklanmış ya da karman çorman bir botanik açık büfede olsa bile hortumuyla bulabilir.[62] Bu hayvanlar tanımadıkları kokuları öğrenebilir:[63] İnsanlara kokusuz gelen TNT'yi saptamak için kısa bir eğitim alan üç Afrika fili, özel eğitilmiş arama köpeklerinden bile daha becerikliydiler. Bu fillerden ikisi, Chishuru ve Mussina, farklı insanların kokularını taşıyan dokuz kavanoz içinde, daha önce kokladıkları bir kişinin kokusunu bulabiliyorlardı.[64] Asya filleri de altta kalmaz.[65] Bir çalışmada, üstü kapalı iki kovadan hangisinde daha fazla yiyecek olduğunu sırf koklayarak saptayabilmişlerdi. Bu insanların becerebileceği bir şey olmadığı gibi, (Alexandra Horowitz'in yaptığı bir deneyde) köpekleri bile zorlamıştı.* "Bakarak aradaki farkı anlayabilirdik ama sadece koklayarak bunu yapma şansımız yok," diyor Bates. "Fillerin koklayarak elde edebildiği bilgi, bizim anlayabileceğimizin çok ötesindedir."

Filler tehlikenin de kokusunu alır. Bates, Amboseli'ye geldikten bir süre sonra meslektaşlarından biri, iki Maasai erkeğini ekibin yıllardır

* Horowitz, bunun, köpeklerin motive olmamasından kaynaklanabileceğini düşünüyor.

kullandığı ciple bir yere götürmüştü. Ertesi gün ekip ciple araziye çıktığında filler, aşina oldukları aracın etrafında beklenmedik ölçüde temkinli davrandılar. Genç Maasai erkekleri filleri bazen mızrakla avlar; o nedenle Bates, cipe sinmiş kokuların (Maasai'lerin güttüğü ineklerin, yedikleri süt ürünlerinin ve vücutlarına sürdükleri aşıboyasının kokuları) hayvanları rahatsız ettiğini düşündü. Bu fikri sınamak için fillerin yaşadığı bölgeye çeşitli giysi öbekleri sakladı. Hayvanlar yıkanmış giysilere ya da kendileri için tehdit oluşturmayan Kamba'ların giysilerine merakla yaklaştı ama endişe belirtisi göstermediler.[66] Fakat Maasai'lerin giysilerinin kokusunu aldıklarında, her seferinde aynı tepkiyi verdiler. "İlk hortum havaya kalkar kalkmaz, bütün grup hemen her seferinde uzun otlara doğru ve olabildiğince hızlı *kaçtı*," diyor Bates. "Çok net bir tepkiydi; her grup, her seferinde aynı şeyi yaptı."

Besin ve düşmanlar dışında pek az koku bir fili başka fillerin kokusu kadar ilgilendirir. Filler birbirlerini hortumlarıyla düzenli olarak inceler, salgı bezlerini, üreme organlarını, ağızlarını yoklayıp dururlar. Afrika filleri uzun bir ayrılığın ardından bir araya geldiklerinde hummalı bir selamlaşma ritüelleri olur.[67] Kulaklarının yelken gibi açılıp kapandığını görebilir, gırtlaktan gelen homurtuları duyabilirsiniz ama bu sırada filler bir koku curcunası yaşamaktadır. Filler coşkuyla işer ve dışkılarken, bir yandan da gözlerinin arkasındaki salgı bezlerinden boşalan aromatik sıvılar havayı kokularla doldurur.

Pek az kişi, fillerin kokularını, "fil atıklarının ve salgılarının kraliçesi" olarak bilinen biyokimyager Bets Rasmussen* kadar yakından incelemiştir.[68] File ait bir salgı söz konusuysa Rasmussen büyük olasılıkla daha önce koklamış, hatta muhtemelen tadına da bakmıştır. Rasmussen bu salgıların feromonlarla dolu, yani anlam yüklü olduğunu fark etmişti. On beş yıllık çalışmanın ardından 1996'da dişi fillerin idrarında bulunan ve çiftleşmeye hazır olduklarını erkeklere haber veren Z-7-dodesen-1-il asetat adlı kimyasal maddeyi ayrıştırdı.[69] Tek bir bileşiğin bu kadar karmaşık bir

* Dişilerin öncülük ettiği anaerkil topluluklar halinde yaşayan fillerin duyularıyla ilgili çalışmalara da kadınlar öncülük etmiştir: koku duyusu alanında Bets Rasmussen, işitme duyusu alanında Katy Payne, Joyce Poole ile Cynthia Moss ve sismik duyular alanında Caitlin O'Connell. Rasmussen dışındakilerle sonraki bölümlerde tanışacağız.

hayvanın cinsel hayatını bu denli fazla etkilemesi şaşırtıcıydı. Daha şaşırtıcıysa dişi güvelerin de erkekleri cezbetmek için aynı maddeyi kullanmalarıydı. Neyse ki erkek güveler dişi fillerin cazibesine kapılmıyordu çünkü onları çeken madde, eş arama listelerindeki bileşiklerden sadece biriydi. Ve neyse ki erkek filler, çok az feromon ürettikleri için dişi güvelerle çiftleşmeye çalışmıyordu. Buna karşılık diğer filler onlar için işaret fişeği gibi parlıyordu. Sonunda Rasmussen, fillerin koku yoluyla dişinin üreme döngüsünün hangi döneminde olduğunu ya da erkek filin aşırı saldırgan olduğu mest ("musth") denen kızışma dönemine ne zaman girdiğini anlayabildiklerini keşfetti.[70] Ayrıca filler bireyleri kokularından tanıyabilir. Yaşam alanlarını birbirine bağlayan ve zamanla silinen ayak izlerini takip ederken geride dışkı ve idrar bırakırlar; bunlar atık değil, civardaki fillerin hortumlarıyla okuyabilecekleri şahsi hikâyelerdir.[71]

2007'de Lucy Bates bu fikri sınamak için zekice bir yöntem buldu.[72] Fil ailelerini takip etti ve birinin işemesini bekledi. Sürü ayrıldıktan sonra, idrarı emen toprağı el küreğiyle toplayıp dondurma kutusuna koydu. Sonra da savanda aynı ya da başka bir fil sürüsüne rastlayana dek dolaştı. Bulduğu sürünün önünü kesip topladığı toprağı yollarına döktü ve uzaktaki bir gözlem noktasına gidip beklemeye başladı. "Yaptığım en hoş deney değildi," diyor Bates. "Çoğunlukla siz ne tarafa gittiklerini bildiğinizi sanıp örneği yere bırakır bırakmaz onlar yön değiştirir. Oldukça sıkıcıydı." Bates'in başarılı olduğu her denemede, filler örneğe yaklaşırken idrarı tetkik etmişti. Koku farklı bir aileye aitse ilgilenmemişlerdi. Bulundukları birimin o anda parçası olmayan bir aile bireyine aitse daha fazla ilgilenmişlerdi. Fakat aynı grubun parçası olup *arkalarından yürüyen* bir file aitse özellikle meraklanmışlardı. İdrarı kimin bıraktığını kesinlikle biliyorlardı; o bireyin grubun önüne ışınlanması mümkün olmadığından kafaları karışmış gibiydi ve yeri yanlış olan kokuyu dikkatle incelemişlerdi. Filler büyük aile grupları halinde hareket eder ve anlaşılan, sadece etrafta kimlerin olduğunu değil, o bireylerin nerede olduğunu da bilirler. Koku, bu farkındalığı perçinler. "Yürürken aldıkları bütün o farklı kokulardan durmaksızın topladıkları onca bilgi... herhalde çok fazla olsa gerek," diyor Bates.

Bu bilginin esasını anlamak zor. Kokular kolay kolay yakalanmaz; o nedenle biliminsanları bir hayvanın fotoğraflarını çekebilir, seslerini

kaydedebilirken, koku duyusuyla ilgilenenler idrar emmiş toprak gibi şeyler toplamak zorunda kalabilir. Kokuların tekrar üretilmesi de kolay değildir: Bir kokuyu hoparlörle dinletemez, ekranda gösteremezsiniz. Bu yüzden araştırmacılar fil sürülerinin önüne çişli toprak koymak zorunda kalabilir. O da koku duyusu üzerine düşünüyorlarsa tabii. Fil araştırmacıları çoğu zaman, bu hayvanların beyinlerini, ayna gibi nesneler kullandıkları görsel deneylerle sınamıştır. Bir filin başlıca duyularını görmezden geldiğimiz için fil zihniyle ilgili kimbilir neler kaçırdık!

En sevdikleri rotalarda yürürken ve diğer fillerin kokulu atıklarıyla karşılaştıklarında, fillerin kimliğinden başka hangi bilgileri edinirler? Daha önce oradan geçmiş fillerin duygusal durumlarını anlayabilirler mi? Stresi hissedebilir, hastalıkları teşhis edebilirler mi? Daha geniş çevrelerivle ilgili ne hissederler? Savaş sonrası Angola'ya dönen filler görünüşe göre hâlâ ülke topraklarındaki milyonlarca mayının arasında dolaşıyor; nitekim fillerin TNT'yi bulmayı ne kadar çabuk öğrendiğini düşünürsek bu o kadar da şaşırtıcı olmayabilir.[73] Fillerin kuraklık zamanı kuyular kazdığı biliniyor.[74] Nitekim Amboseli'de çalışmış bir başka araştırmacı olan George Wittemyer, fillerin yeraltındaki suyun kokusunu aldığından emin. Ayrıca fillerin, uzak topraklara yağan yağmurun açığa çıkardığı kokulardan yağmurun yaklaştığını anlayabildiklerini düşünüyor. "O koku insanın içini kıpır kıpır yapar," diyor Wittemyer. "Bana heyecan ve yaşam enerjisi verir; fillerin de bu kokuyu alınca coştuğunu görürsünüz."

Rasmussen bir zamanlar fillerin uzun göçlerini "peyzajın, arazinin, patikaların, mineral ve tuz kaynaklarının, su birikintilerinin, yağmurun ya da taşan nehirlerin ve ağaçların mevsimlere göre değişen kokularından oluşan kimyasal anılar" rehberliğinde gerçekleştirdiğini öne sürmüştü.[75] Kimse tarafından sınanmamış olsa da akla yakın bir iddiadır bu. Ne de olsa köpekler, insanlar ve karıncalar kokuların izini sürebilir. Somon balıkları da dünyaya geldikleri suların kendine has kokularını alarak aynı akarsuya geri dönebilir.[76*] Kamçılı örümcekler, son derece

* Arthur Hasler, 1950'lerde yaşadığı koku duyusuyla ilgili aydınlanmanın ardından bu yetiyi doğrulamıştı. Bir çağlayanın yakınlarında yürüyüş yaparken burnuna gelen tanıdık kokular çok eski çocukluk hatıralarını canlandırınca, somon balıklarının da göç ederken benzer bir tecrübe yaşayıp yaşamadığını merak etmişti.

uzun ve incecik ön bacaklarının ucundaki koku sensörlerinin yardımıyla yağmur ormanının karmaşası içinde yuvaya dönüş yolunu bulabilir.[77] Kutup ayıları, ayaklarındaki salgı bezleri her adımda koku bıraktığı için binlerce kilometrelik buzda kaybolmadan dolaşabilir.[78] Bu örnekler o kadar yaygındır ki bazı biliminsanları, hayvanlarda koku duyusunun temel amacının kimyasalları saptamak değil, o kimyasallar yardımıyla dünya üzerinde yol bulmak olduğunu düşünmektedirler.[79] Bu işe uygun burunlar, gözümüzle gördüğümüz manzaraları, hoş kokulu nirengi noktalarının besine ya da yuvaya giden yolları gösterdiği koku manzaraları olarak haritalandırabilir. İşin garip yanı, bu özelliklere dair en güçlü deliller, kısa süre öncesine kadar koku alamadığı düşünülen hayvanlardan elde edilmiştir.

Hırslı bir natüralist ve ressam olan John James Audubon, en çok Kuzey Amerika kuşlarını resmetmiş olması ve bu resimleri topladığı ufuk açıcı, büyük kuşbilim kitabıyla tanınır.[80] Fakat aynı zamanda, akbabalar ve diğer kuşlarla ilgili, asırlar süren bir yanılgının tohumlarını eken vahim deneylerin de sorumlusudur.

Âlimler Aristoteles'ten beri akbabaların keskin bir koku duyusu olduğuna inanıyordu. Audubon'sa farklı düşünüyordu. Akbabalar, açık alana bıraktığı kokuşmuş domuz leşine gelmemişti. Fakat bir hindi akbabası gelip içi samanla doldurulmuş geyik postunu gagalamıştı. Audubon 1826'da bu kuşların besinlerini kokuyla değil görerek bulduğunu iddia etti.[81] Yandaşları aynı derecede şüpheli delillerle bu iddiayı destekledi. İçlerinden biri, akbabaların iç organları çıkartılmış bir koyun resmine saldırdığına ve tutsak akbabaların kör edildikten sonra yemek yemediğine dikkat çekmişti. Bir başkası, bir hindinin –hindi akbabasından değil, gerçek bir hindiden söz ediyordu– güçlü bir öldürücü olan sülfürik asit ve potasyum siyanür karışımı sürülmüş besini, keskin kokulu olmasına rağmen yediğini göstermişti. Bu tuhaf çalışmalar ikna edici oldu. Akbabaların taze leşi tercih ettiğini ve Audubon'un kullandığı gibi fazla kokuşmuş etle ilgilenmeyeceğini boş verin. Audubon'un, koku duyusunu daha az kullanan siyah akbabaları, hindi akbabalarıyla karıştırdığını ya da yağlı boyanın yaydığı bazı kimyasalların, kokuşan ette de bulunduğunu unutun. Sakatlanmış bir hayvanın haliyle pek aç

olmayabileceğini görmezden gelin. Hindi akbabalarının –ve kuşkulu bir genellemeyle *hiçbir kuşun*– koku almadığı görüşü klasik kitaplara girdi. Tam tersini destekleyen deliller yıllarca yok sayıldı ve kuşların koku duyusuyla ilgili çalışmalar ihmal edildi.*

Betsy Bang bu çalışmaları yeniden canlandırdı.[83] Amatör bir kuşbilimci ve bir tıbbi illüstratör olan Bang, kuşların burun boşluklarını kesip açarak gördüklerini çizdi. Ve gördüğü şey –köpeğin burnundakine benzer ince kemik kıvrımlarıyla dolu geniş boşluklar– onu kuşların koku alabildiğine ikna etti. Yoksa ne diye böyle bir donanımları olsundu? Bang, klasik kitapların yanlış bilgi aktardığı endişesiyle 1960'lı yılları yüzün üzerinde kuş türünün beyinlerini dikkatle inceleyerek ve koku soğancıklarını ölçerek geçirdi.[84] Bu küçük merkezlerin hindi akbabalarında, Yeni Zelanda kivilerinde ve tüp burunlu kuşlarda (albatroslar, fırtına kuşları ve yelkovan kuşlarını içeren bir grup deniz kuşu) özellikle büyük olduğunu gösterdi. Tüp burunlular bu adı, gagalarının üstündeki belirgin burun deliklerinden alır; başlangıçta bunların tuzu dışarı atan kanallar olduğu düşünülmüştü. Bang'in çalışmalarıysa başka bir işlevi olduğunu düşündürdü: Bu kanallar sayesinde kuşlar, burunlarına hava çekerek okyanus üstünde süzülürken besinin kokusunu alır. "Koku duyusu onlar için her şeyden önemlidir," diye yazmıştı Bang.[85]† (Sonraları oğlu Axel "Kapışmak umurunda bile değildi; hatta bu, Audubon'la kapışmak anlamına gelse bile," demişti.)

---

* Ornitolog Kenneth Stager, Audubon'un çalışmalarından çok daha iyilerini yürüttü ve hindi akbabalarının gerçekten de saklı leşlerin kokusunu aldığını gösterdi. Ayrıca bir petrol şirketinin, sızıntıları izlemek için boru hattına osurukla çürüme arası bir koku yayan etil merkaptan gazı ekleyip gökyüzünde daireler çizen akbabaları taradığını öğrendi. Meraklanan Stager, havaya merkaptan veren bir cihaz yaptı bunu Kaliforniya'da çeşitli noktalara yerleştirdi. Her seferinde akbabalar geldi. Audubon yanılmıştı: Hindi akbabaları koku almakla kalmıyor, kilometrelerce öteden gelen en hafif koku moleküllerini bile saptayacak kadar iyi koku alabiliyordu.

† Kuşlar, meşhur *Velociraptor*'u da içeren küçük, yırtıcı bir dinozor grubundan evrildi. Bu hayvanların kafataslarını inceleyen paleontolog Darla Zelenitsky, daha iri kuzenleri *Tyrannosaurus* gibi onların da koku soğancıklarının cüsselerine göre büyük olduğunu gösterdi.[86] Bu dinozorlar koku duyusunu muhtemelen avlanmak için kullanıyordu; kuşlar ise eski çağlardaki Umwelt'in günümüzdeki varisleridir.

Kaliforniya'da, başka yerde Bernice Wenzel da aynı sonuca varmıştı.[87] Fizyoloji profesörü Wenzel (1950'lerde ABD'de bu unvana sahip az sayıda kadından biriydi), posta güvercinlerinin kalp atımlarının, havada hafif bir koku yakaladıkları anda hızlandığını ve koku soğancıklarındaki nöronların heyecanla vızıldamaya başladığını gösterdi. Aynı testi hindi akbabası, bıldırcın, penguen, kuzgun ve ördek gibi başka kuşlarla tekrarladığında hepsi benzer tepkiler verdi.[88] Bang'in çıkarımının doğru olduğunu böylece kanıtlamış oldu: Kuşlar koku alabiliyorlardı. Yanlış dogmalara karşı çıkan ve var olmadığı farz edilen bir duyusal dünyanın araştırılmasını sağlayan müteveffa Bang ve Wenzel, "kendi kuşaklarının asileri" olarak tanımlanmıştır.[89] Ortaya koydukları örneklerden ve hocalık vasıflarından ötürü, onların izinden giden biliminsanları da yine çoğunlukla kadınlardan çıkıyordu.

Onlardan biri olan Gabrielle Nevitt, Wenzel'ın emekli olmadan önce deniz kuşlarıyla ilgili çalışmaları hakkında yaptığı son konuşmalardan birine dinleyici olarak katılmıştı. Wenzel'dan ilham alan Nevitt, meslek hayatı boyunca tüp burunluların koku duyusundan nasıl faydalandığını araştırdı. 1991'den itibaren katılabildiği her Antarktika seferine katıldı ve bana söylediğine göre bu yolculuklarda "bir buzkıran gemisinin güvertesinde, başına bir iş gelmeden kuşları sınamanın yollarını aradı." Balık yağına batırdığı tamponları uçurtmalarla uçurdu. Geminin kıçından suya keskin kokulu yağlar bıraktı. Tüp burunlular her seferinde geldi. Nevitt bu kuşları çeken şeyin keskin kokulu yağdaki belirli bir kimyasal olduğundan şüpheleniyordu ama bu maddenin ne olabileceğini ya da kuşların onu her yerde aynı görünen bu sularda nasıl bulduğunu bilmiyordu. Bu sorunun yanıtını daha sonraki Antarktika seferlerinden birinde, hiç beklemediği koşullarda öğrenecekti.

Yolculuk sırasında gemi şiddetli bir fırtınaya yakalanmış, Nevitt sallantıda kamaranın bir ucuna savrulup alet edevat sandığına çarpmıştı. Darbenin etkisiyle böbreği yırtılan Nevitt ranzasına mahkûm olmuş, bu arada limana yanaşan gemiye yeni mürettebat katılmıştı. İyileşmeye çalışan Nevitt, başuzman Tim Bates ile sohbet ediyordu. Atmosfer kimyageri Bates, geziye dimetil sülfid (DMS) gazını

araştırmak için katılmıştı. Okyanuslardaki plankton, karides benzeri kriller tarafından yendiği zaman DMS açığa çıkarır. Krilleriyse balinalar, balıklar ve deniz kuşları yer. DMS suda kolay çözünmez ve sonunda havaya karışır. Yeterince yükselirse bulutların yapısına katılır. Bir denizcinin burnuna geldiğinde Nevitt'in "istiridye kokusuna çok benzeyen" ya da "yosunumsu" olarak tarif ettiği bir koku olarak hissedilir. Bu, deniz kokusudur.

DMS, özellikle muazzam miktarlarda planktonun yine aynı derecede muazzam balina sürülerini beslediği *bereketli* denizlerin kokusudur. Nevitt, Bates ile konuşması sırasında DMS'nin, avlanacak canlılarla dolup taşan sularda deniz kuşları için yemek zilini çalan kimyasalın ta kendisi olabileceğini düşündü. Bates'in Nevitt'e verdiği, Antarktika'nın farklı bölgelerindeki DMS düzeylerini gösteren harita bu izlenimi güçlendirdi. Nevitt, kimyasalın denizdeki değişken düzeylerinin oluşturduğu peyzajda, buram buram kokan dağlar ve kokusuz vadiler bulunduğunu gördü.[90] Okyanusun, bir zamanlar düşündüğü gibi tekdüze olmadığını anladı; onun gözle görülemeyen ama burun için aşikâr olan gizli bir topografyası vardı. Nevitt, denizi bir deniz kuşunun algıladığı biçimde algılamaya başlamıştı.

Ayağa kalkar kalkmaz, DMS varsayımını doğrulayan bir dizi çalışma yaptı.[91] Tüp burunluların kimyasalın yoğunlaştığı yerlerde kümelendiğini buldu. Rüzgârla sürüklenebilecek, belli belirsiz izlerde bu kimyasalı saptayabileceklerini hesapladı.[92] Hatta bazı tüp burunluların daha uçmaya başlamadan DMS'nin çekimine kapıldığını gösterdi.[93]* Birçok tür derin oyuklarda yuva yapar ve bu kuşların greyfurt büyüklüğündeki keçe yumaklarına benzeyen yavruları karanlık bir ortamda yumurtadan çıkar. Bu yavruların ilk Umwelt'i ışıksızdır ama oyuğun girişinden süzülen ya da ana babalarının gagaları ve tüyleriyle taşıdığı kokularla sıvanmıştır. Yavrular okyanusa dair hiçbir şey bilmedikleri halde, doğrudan DMS'ye yönelmeleri gerektiğini bilirler. Aydınlığa kavuştuktan, klostrofobik kreşlerinden çıkıp engin gökyüzüyle tanıştıktan sonra bile koku onların kutup yıldızı olmaya devam eder. Su

* DMS'nin izini süren, sadece tüp burunlular değildir. Penguenler, resif balıkları ve deniz kaplumbağaları da bu kimyasalın kokusunu alıp çekimine kapılır.

altındaki krillerin yerini ele veren koku bulutlarının peşinde binlerce kilometre uçarlar.*

Gelgelelim kokular yemek zilinden daha etkilidir. Aynı zamanda okyanustaki yön tabelalarıdır. Deniz altındaki dağlar ya da deniz tabanındaki eğimler, sudaki besin miktarını ve bu da plankton, kril ve DMS yoğunluğunu etkiler. Deniz kuşlarının izini sürdüğü koku peyzajları, gerçek coğrafi peyzajlarla yakından bağlantılı olduğundan şaşırtıcı ölçüde öngörülebilirdir.[95] Nevitt, deniz kuşlarının, burunlarını kullanarak en zengin beslenme noktalarının ve yuvalarının yerlerini öğrendiğini ve zamanla bu özelliklerin bir haritasını oluşturduğunu düşünüyor.

Sınanması zor olsa da Anna Gagliardo bu fikrin doğru olabileceğine dair ikna edici deliller buldu. Bir tüp burunlu olan boz yelkovan kuşlarından birkaçını koloninin yuvalarından 800 kilometre kadar uzağa taşıyıp burun yıkama yöntemiyle koku duyularını geçici olarak işlevsiz hale getirdi.[96] Serbest bırakılan kuşlar yuvalarına dönmeye çalıştı ama yelkovan kuşlarının normalde günler süren yolculuğu bu kuşlarda haftalar, hatta aylar sürdü. Koku duyusu olmayınca yollarını kaybetmişlerdi. Koku olmayınca okyanus nirengi noktalarından yoksundu. Yazar Adam Nicolson'ın *The Seabird's Cry* adlı kitabında dediği gibi, "Bize tekdüze ve her tarafın aynı olduğu bir yer israfıymış gibi gelen okyanus, onlara zengin bir çeşitliliğe sahip, yer yer yoğun, yer yer ince, çatlak çatlak, kırış kırış bir manzara; farklı tonlarla bezeli ve güvenilmez, yaşamla benek benek, hoşluklar ve tehlikelerle alacalı, ebruli ve lekeli, zenginliği çoğunlukla gizli ve her zaman hareketli olan ama yaşama ve olasılıklara gebe yerlerle dolu, arzulanan ve arzulanmaya değer kokuların bulunduğu iniş çıkışlı bir kır manzarası gibi görünür."[97]

---

* Koku bulutlarının izini düz bir hattı takip ederek sürmek daha zordur. Bir kuşun önündeki en iyi seçenek, bir koku molekülüne toslama şansını olabildiğince artırmak için rüzgârı karşısına alarak uçmak ve yakaladığı koku molekülünü rüzgâra karşı zikzak çizerek takip etmektir. Erkek güveler, dişilerin yaydığı feromonları ve albatroslar avlarının yaydığı kokuları bu şekilde bulur. Henri Weimerskirch, kanat açıklığı en geniş kuş olan gezgin albatrosları takip etmek için hayvanlara GPS izleme birimi ve yemek yerken mide sıcaklığını kaydeden bir cihaz takmıştı.[94] Bu verileri analiz eden Gabrielle Nevitt, kuşların, besinlerinin en az yarısını zikzak çizerek ve kokuların izini sürerek yakaladığını gösterdi.

***

Yelkovan kuşları, köpekler, filler ve karıncaların koku organları farklıdır ama hepsi bir çift burun deliği ya da antenle stereo koku alır. Böylece her iki tarafa konan koku moleküllerini karşılaştırarak kokunun kaynağını saptayabilirler.[98] Bunu insanlar bile yapabilir: Alexandra Horowitz'in denememi istediği ip izleme testini yapmak, burun deliklerinden biri kapatıldığında çok daha zordur. Çift dedektör, kokunun hangi yönden geldiğini anlamayı kolaylaştırdığı gibi, doğanın en olmayacak ama en etkin koku organının, yılanların çatal dilinin kendine özgü biçimini de açıklar.

Yılanların dili ruj kırmızısı, elektrik mavisi ve is karasının farklı tonlarında olabilir. Yılan dili uzatılıp yayıldığında yılanın kafasından daha uzun ve geniş olabilir. Yılan diline yıllardır hayran olan Kurt Schwenk bu konuda genellikle kendini yalnız hissediyor. Doktorasının ikinci yılında, bilimle uğraşmanın hazzını aynı kafadan biriyle paylaşma hevesine kapılıp üzerinde çalıştığı konuyu bir başka doktora öğrencisine anlatmış, şimdilerde ünlü bir ekolog olan öğrenci arkadaşı anlatılanlara gülmekten kırılmış. "Bu kadarı hislerimi incitmeye yeterdi ama bu adam, sinekkuşlarının burun deliklerindeki akarları araştırıyordu," diyor hâlâ birazcık kızgın olan Schwenk. "Sinekkuşunun burun deliğindeki akarları araştıran biri, *benim* yaptığım şeyin komik olduğunu düşündü! Ne hikmetse insanlar dili komik buluyor."

Belki de seks ve yemek gibi bedensel hazlarla ilgili organları incelemenin münasebetsiz bir tarafı vardır. Belki şaka yaparken ya da nispet olsun diye çıkardığımız bir organı ciddi ciddi araştırmak tuhaf kaçıyordur. Ya da belki çatal dil, kötü niyetin ve ikiyüzlülüğün simgesi haline geldiği içindir. Sebebi ne olursa olsun ciddi akademisyenler yılanın dilini nasıl kullandığına ya da dilinin niye çatallı olduğuna dair çok garip birtakım varsayımlar üretmiştir.[99] Bazıları yılan dilini zehirli bir iğne, sinek yakalayan bir maşa ya da el gibi bir dokunma organı, hatta burun deliğini temizleme aracı olarak tanımlamıştı. Aristoteles, yılanın çatal dili sayesinde besinden iki kat fazla haz aldığını ileri sürmüştü. Oysa yılan dilinde tat tomurcukları yoktur ve dil kendi başına herhangi bir duyusal enformasyon iletmez. Biliminsanlarının en sonunda 1920'lerde

keşfettiği gibi, yılan dili bir kimyasal toplayıcıdır. Dış dünyaya uzandığında çatalın uçları yerdeki ya da havada sürüklenen koku moleküllerini yakalar. Yılan dilini geri çekince tükürük bu kimyasal ödülü, beynin koku merkezlerine bağlanan ve vomeronazal organ denen bir çift odacığa götürür.* Yılan, diliyle dünyayı *koklar*. Dili çıkarıp geri çekme, koku almak için burun çekmeye denktir. Nitekim yumurtadan çıkan yılan yavrusunun ilk yaptığı, bu şekilde dilini oynatmaktır. "Bu da bize koku duyusunun önceliği konusunda fikir verir," diyor Schwenk.

Erkek jartiyer yılanı [*garter snake*], geride bıraktığı feromonları diliyle takip ederek dişi yılanı bulabilir.[100] Dişinin sürünerek arasından geçtiği nesnelerin farklı yanlarında bıraktığı feromonları karşılaştırarak hangi yöne gittiğini anlayabilir.[101] Onu bulur bulmaz, muhtemelen diliyle havayı bir iki kez koklayarak dişinin boyutlarını ve sağlıklı olup olmadığını kestirebilir. Bütün bunları karanlıkta da yapabilir. Hatta onu, dişi yılanın kokusuna bulanmış kâğıt havlu rulosuyla kandırıp çiftleşmeye heveslendirmek mümkündür. Fakat bunların hepsi, insandaki gibi kürek biçimli bir dille de yapılabilir. Öyleyse yılanların dili niye çatallı? Schwenk, yılanların çatal sayesinde uzayda iki noktanın kimyasal izlerini karşılaştırarak stereo koku alabildiği sonucuna vardı.[102] Çatalın iki ucu da feromonları saptayabilmişse yılan aynı rotada ilerler. Sağdaki uç feromonu saptamış, soldaki saptamamışsa yılan dümeni sağa kırar. Dilin iki ucu da eli boş dönmüşse, yılan koku izini tekrar yakalayana dek başını sağa sola sallar. Yılan, çatal dili sayesinde, izlediği yolun kenarlarını kusursuz biçimde belirleyebilir.

Şeritli çıngıraklıyılan [*timber rattlesnake*] orman zemininde sürünürken, dünyayı hem bir haritaya hem de menüye dönüştüren dili, koşuşan kemirgenlerin koku izlerini ortaya çıkarır ve farklı türlerin kokularını ayırt etmesini sağlar. Yılan, birbirine karışmış koku izleri arasında en

* Araştırmacılar çok uzun zaman, yılanın, çatal dilinin uçlarını damağındaki iki delikten sokarak kimyasalları Jacobson organı olarak da bilinen vomeronazal organa ilettiğini iddia etmişlerdi. Ancak bu doğru değil. X ışınları altında yapılan kamera çekimleri öyle olmadığını, yılanın dilini damağının altına çektiğini gösterdi. Fakat Schwenk için bitmek bilmeyen bir sıkıntı kaynağı olan bu yanlış anlama hâlâ devam ediyor ve ders kitaplarında çokça yer buluyor.

sevdiği avın* kokusunu seçebilir; bu izlerin yoğun ve taze olduğu yerleri bulabilir. Yakınlarda saklanır, çöreklenip pusuya yatar. Yanından geçen bir kemirgene saldırırken insan göz kırpmasından dört kat hızlı hareket eder. Kemirgeni ısırır ve zehrini zerk eder. Toksinlerin etki göstermesi genellikle biraz zaman alır ve kemirgenlerin sivri dişleriyle yaralanmaktan sakınan yılan avını serbest bırakıp kaçmasına izin verir. Dakikalar sonra diliyle havayı koklayarak artık ölmüş kurbanının izini sürer. Zehir buna yardımcı olur. Çıngıraklıyılan zehri, öldürücü toksinlerin yanı sıra, toksik olmayan ama kemirgenin dokularıyla etkileşerek koku moleküllerinin açığa çıkmasına neden olan bileşikler (disintegrinler) içerir.[104] Yılanlar bu aromalar sayesinde zehirlenmiş kemirgenlerle sağlıklı olanları ya da *kendi türünden* bir yılanın zehirlediği kemirgenlerle başka çıngıraklıyılan türlerinin ısırdıklarını birbirinden ayırabilir.[105] Hatta yılan ısırırken kurbanının kokusunu anında öğrendiği için saldırdığı kemirgenin izini sürebilir. "Etrafta muhtemelen birden fazla farenin kokusu vardır ama onlar hangi izin peşinden gideceğini bilir," diyor Schwenk.

Yılanlar esintideki kokuları da yakalayabilir. Schwenk'in eski öğrencilerinden Chuck Smith, radyo vericisi taktığı bakır kafalı çıngıraklıyılanların [*copperheads*] hareketlerini izleyerek bunun doğru olduğunu gösterdi.[106] İki kez doğaya saldığı dişi yılanı bıraktığı yerde beklerken seyretti. Yılan bir koku izi bırakmış olamazdı. Buna rağmen yüzlerce metre ötede dolaşan erkekleri kendine çekmeyi başardı; erkekler aniden yön değiştirip dümdüz dişiye doğru ilerlediler.

Schwenk'in tahminine göre işin sırrı yılanların dilini kullanma biçimindeydi. Yılanların evrildiği kertenkeleler de dilleriyle koku alır ve bazılarının dili çatallıdır. Fakat kertenkele dilini dışarı çıkardığında genellikle bir kez hareket ettirir. Dilin uçları uzanır, yeri sıyırır ve geri çekilir. Yılanlarsa istisnasız olarak dillerini tekrar tekrar ve hızlı hareket ettirir ve çoğunlukla yere dokunmazlar. Dilleri sanki menteşeliymiş

* Sonraki bölümde tanışacağınız Rulon Clark, laboratuvarda dünyaya gelmiş tecrübesiz çıngıraklıyılanların sevdiği, çizgili sincap ve beyaz ayaklı fare gibi avların kokularını, aşina olmadıkları laboratuvar sıçanlarının kokusundan ayırt edebildiklerini gösterdi. Ayrıca fesat bir yaklaşımla, özellikle yavruları olan dişi farelerin kokusunun pembe boa yılanlarına [*rosy boa*] çekici geldiğini keşfetti.[103]

gibi ortadan katlanır ve uçları saniyede 10-20 kez geniş bir yay çizer. Schwenk'in bir diğer öğrencisi Bill Ryerson, bu hareketleri analiz etmek için yılanları mısır nişastası bulutları içinde dillerini çıkarırken gözlemledi.[107] Nişasta bulutlarını lazerle aydınlattı ve yüksek hızlı kameralarla dönen parçacıkların filmini çekti. Schwenk, filmi gördüğü anki tepkisini anlatırken, "Aklım başımdan gitti," diyor.

Her dil çıkarma hareketinin sonunda uçların yayılarak birbirinden ayrıldığı ve yarı yolda birbirine yaklaştığı anlaşıldı. Bu hareketin yarattığı, sürekli hareket halinde olan simit şeklindeki iki hava akımı, yılanın sağından ve solundan gelen koku moleküllerini kendine çeker. Yılan âdeta iki yandan kokuları emen iki büyük pervaneyi bir süreliğine açıp havada yayılmış koku moleküllerini dilinin uçlarında toplar. Koku molekülleri hem sağdan hem de soldan geldiği için çatal havada sallanırken yılana bir yön hissi verebilir.

Bu koklama tarzı iki açıdan sıradışıdır. Birincisi, alışılageldik tat organı olan dil kullanıldığı için. Yılanlar, biraz sonra değineceğim sebeplerden ötürü tat duyusunu pek az kullanır. İkincisi, diğer hayvanlarda bulunmayan ya da ikincil öneme sahip bir organ kullanıldığı için. Omurgalı hayvanların çoğu, koku moleküllerini saptamak için *iki* ayrı sistemden faydalanır. Ana sistem, bu bölümün başında verdiğim köpek örneğinde olduğu gibi, bütün yapıları, reseptörleri ve nöronları içeren sistemdir. Vomeronazal organ bu sistemin yardımcısıdır; kendine has koku algılayan hücreleri, kendi duyu nöronları ve beyinle kendi bağlantıları vardır. Genellikle burun boşluğunun içinde, üst damağın hemen üzerinde bulunur. Kendinizinkini bulmak için boşuna zahmet etmeyin. Her nedense biz insanlar ve diğer kuyruksuz maymunlar da balinalar, kuşlar, timsahlar ve bazı yarasalar gibi evrim sürecinde vomeronazal organımızı kaybettik.[108]

Diğer memelilerin, sürüngenlerin ve amfibilerin çoğunda bu organ korunmuştur. Bir fil hortumuyla başka bir file dokunduktan sonra hortumunun feromonla kaplı ucunu ağzına götürdüğünde bu moleküller doğruca vomeronazal organa gider. Atlar ya da kediler üstdudaklarını dışarı kıvırıp dişlerini gösterdiğinde, burun deliklerinin önünü keser, nefesle aldıkları koku moleküllerini vomeronazal organa gönderirler. Yılan dilini içeri çekip uçlarını ağzın tabanıyla tavanı arasında

sıkıştırdığında, topladığı molekülleri vomeronazal organa püskürtür. Yılanlarda bu yardımcı organ assolisttir. O olmadan jartiyer yılanları iz süremez, yemeden kesilir; çıngıraklıyılanlarsa atakların yarısında çuvallar ve saldırdığı hayvanı yakalayamaz.[109] Bu yılanlar koku moleküllerini burun deliklerinden de alabilir ama görünüşe göre "ana" koku sistemi bu enformasyonla ne yapacağını bilemez. Daha pasif bir rol üstlenen bu sistem, etrafta dille koklamaya değecek ilginç bir şey olup olmadığına dair beyne bilgi verir.

Yılanlar sadece vomeronazal organa sahip oldukları için değil, biz bu organın ne yaptığını gerçekten anlayabildiğimiz için de sıradışıdır. Diğer hayvanlarda bu organ, hakkındaki iddialı söylemlere karşın gizemini koruyor.[110*] Bazı türlerde niye iki ayrı koklama sistemi bulunduğunu şimdilik kimse bilmiyor. Çoğu hayvanda ikinci bir kimyasal duyu bulunmasının sebebi de açık değil. Tat duyusunu kastediyorum elbette.

Her yıl nisan ayında Florida'da, Kimyasal Algılama Bilimleri Derneği'nin yıllık toplantısı yapılır ve koku duyusunu araştıran biliminsanları ile tat duyusunu araştıranlar, gelenekselleşmiş heyecanlı bir softball maçında karşı karşıya gelir. "Genellikle koku takımı kazanır," diyor kokubilimci Leslie Vosshall, "çünkü sahamız çok daha geniş. Oran dörde ya da beşe bir gibi." Koku alma gibi tat alma –ya da bilim dilindeki afili terimle konuşursak gustasyon– duyusu da ortamdaki kimyasalları saptamanın bir yoludur. Fakat bunun dışında tat ve koku duyuları birbirinden tamamen ayrıdır. Burnunuzu vanilya yağına yaklaştırırsanız hoş bir koku alırsınız; aynı yağı dilinizin üzerine damlatırsanız muhtemelen tiksintiyle irkilirsiniz.

Kokuyla tat arasındaki fark şaşırtıcı derecede karmaşıktır. Hayvanların burunlarıyla koku, dilleriyle tat aldığını söyleyebilirsiniz ama

---

* Bu organın özelleşmiş bir feromon dedektörü görevi gördüğü efsanesi yaygındır ama bu doğru olamaz çünkü vomeronazal organ başka koku moleküllerine de tepki verir ve ana koku sistemi feromonları da toplar. Vomeronazal organ, ana koku sistemindeki hava yollarından süzülemeyecek kadar ağır molekülleri saptıyor olabilir ama bu olasılık yeterince sınanmamıştır. Ana sistem hayvanların deneyimle öğrendiği tepkileri yönetirken bu organ içgüdüsel tepkileri denetliyor olabilir ama bu olasılık da ayrıntılı olarak sınanmamıştır.

yılanlar dillerini koku moleküllerini toplamak için kullanır; biraz sonra tanışacağımız bazı hayvanlarsa vücutlarının alışılmadık bölümleriyle tat alır. Havada sürüklenen moleküllerin kokusunu, sıvı ya da katı maddelerinse tadını aldığımızı iddia edebilirsiniz (çoğu biliminsanı öyle olduğunu söylüyor). Koku belli bir mesafeden, tat ise temasla alınır. Bu daha iyi bir ayırım ama birkaç sorun var. Öncelikle koku moleküllerinin önce çözünebilmeleri için kokuları tanımamızı sağlayan reseptörler her zaman ince bir sıvı tabakasıyla kaplı olmalıdır. Öyleyse tat gibi kokuda da bir sıvı aşaması bulunur ve kokular ne kadar uzaktan gelirse gelsin yakın temas gerektirir. İkincisi, daha önce de gördüğümüz gibi karıncalar ve diğer böcekler, havada yol alamayacak kadar ağır feromonları antenleriyle toplayarak temas yoluyla koklayabilir. Üçüncüsü, balıklar da koku alır ama kokusunu aldıkları her şey suda çözünmüş halde bulunur. Balıklar gibi sürekli suyun içinde yaşayan canlılar için tat ile koku ayrımı o kadar kafa karıştırıcı olabilir ki bir nörobilimci bir keresinde bana, "Bu konuyu düşünmekten kaçınıyorum," demişti.

Fakat yayınbalıklarını araştıran fizyolog John Caprio'ya göre kokuyla tat arasındaki fark çok açık: Tat duyusu reflekse dayalı ve doğuştan olduğu halde koku duyusu öyle değil.* Acımsı maddelerden kaçınmak doğuştan gelen bir içgüdüdür; bu tepkileri aşmayı öğrenerek bira, kahve ve acı çikolatanın tadına varabilsek de ortada aşılması gereken içgüdüsel bir durum olduğu gerçeği sabittir. Kokularsa tersine, "Biz onları deneyimle ilişkilendirene dek herhangi bir anlam taşımaz," diyor Caprio. Bebekler büyüyene dek ter ve kaka kokusundan tiksinmez. Yetişkinlerin beğendiği ve beğenmediği kokular o kadar değişkendir ki ABD Ordusu kitle kontrolü amacıyla koku bombası geliştirmeye çalışırken bütün kültürlerin tiksindiği evrensel bir koku bulamamıştı.[111] Geleneksel olarak doğuştan gelen tepkileri tetiklediği düşünülen hayvan feromonları bile deneyimle şekillenebilen, şaşırtıcı derecede esnek etkiler gösterir.

O halde tat duyusu daha basittir. Daha önce de gördüğümüz gibi, koku duyusu, sinir sisteminde biliminsanlarının zar zor çözmeye

* Bu iki duyu, beynin farklı bölümlerine bağlanan farklı reseptörler ve farklı nöronlar kullanır. Omurgalılarda tat sistemi çoğunlukla temel yaşamsal işlevleri kontrol eden arka beyinle bağlantılıdır. Koku sistemiyse öğrenme gibi daha ileri becerileri kontrol eden ön beyinle ilişkilidir.

başladığı tertibe dayalı çok zor bir kodla temsil edilen, tarif edilemeyecek kadar geniş bir özellikler yelpazesine sahip, nerede'yse sonsuz sayıda molekül seçeneğini kapsar. Tat duyusuysa tersine, az sayıda reseptörle saptanan sınırlı sayıda temel özelliğe indirgenebilir; insanlarda bu sayı beş (tuzlu, tatlı, acımsı, ekşi ve umami), diğer hayvanlardaysa belki biraz daha fazladır. Ayrıca koku duyusu karmaşık amaçlar –açık okyanusta yön bulmak, av bulmak, sürüleri ve kolonileri eşgüdümlü hale getirmek– için kullanılabilirken, tat duyusu hemen her zaman yiyecekle ilgili ikili bir karar verme sistemine hizmet eder.[112] Evet mi, hayır mı? İyi mi, kötü mü? Yutmalı mı, tükürmeli mi?

Ne gariptir ki en kaba duyulardan biri olduğu halde tat duyusunu ustalık, incelik ve detayları fark etmeyle ilişkilendiririz. Bizi toksik olabilecek yüzlerce bileşiğe karşı uyaran acımsı tadı alma yetimiz bile bu bileşikleri birbirinden *ayırt edecek* şekilde gelişmemiştir. Bizim için tek bir acımsı tat vardır çünkü tadına baktığımız acımsı şeyin ne olduğunu bilmemiz gerekmez; sadece tadına bakmaktan vazgeçmeyi bilmemiz gerekir. Tat duyusu, genellikle bir şeyi tüketmeden önceki son kontrolü sağlar: Bunu yemeli miyim? Yılanlar bu nedenle tadı pek dert etmez. Bir şeyin yemeye değer olup olmadığına ağızlarını sürmeden, dilleriyle *koklayarak* karar verebilirler.* Bir yılanın avlayacağı hayvanı ağzına aldıktan sonra tükürdüğü duyulmamıştır. (Tadı yanlışlıkla aromayla bir tutarız; oysaki aromada koku baskındır. O nedenle soğuk algınlığında yiyecekler lezzetsiz gelir: Yemeğin tadı aynıdır ama kokusunu alamadığınız için aroması zayıftır.)

Sürüngenler, kuşlar ve memeliler dilleriyle tat alır. Diğer hayvanlarsa bu kadar kısıtlı değildir. Çok küçük bir canlıysanız besin hem ağzınıza alacağınız hem de üzerinde yürüyebileceğiniz bir şeydir. O nedenle

* Schwenk bunun, yılanların seyrek öğünler halinde ama topluca yemelerinden kaynaklandığını düşünüyor. Yılanlar genellikle kendi cüsselerine göre çok daha büyük bir avı yakalar, sonra da öğünlerini sindirmek için iç organlarını yeniden biçimlendirirler. Bir domuzu ya da geyiği yutan pitonun bağırsakları ve karaciğeri birkaç günde iki katı büyür, kalbiyse yüzde 40 oranında genişler.[113] Yılanlar için her öğün çok fazla enerji tüketmek anlamına gelir, o nedenle bu bedelin ödenmeye değer olup olmadığına bir an önce karar vermeleri gerekir.

böceklerin çoğu ayakları ve bacaklarıyla tat alabilir. Arılar bir çiçeğin üzerinde durup nektarın ne kadar tatlı olduğunu anlayabilir.[114] Sinekler, yemek üzere olduğunuz elmanın üzerine konup tadına bakabilir.[115] Asalak eşekarıları iğnelerinin ucundaki tat sensörlerini kullanarak, diğer böceklerin vücuduna yumurtalarını bırakabilir.[116] Hatta bir eşekarısı türü, başka asalak türlerin yumurta bırakmış olduğu konakları tadına bakarak boş olanlardan ayırabilir.*

İnsan koluna konan bir sivrisineğin "duyuları bayram eder," diyor Vosshall. "İnsan derisinin tadı, onlara doğru yerde olup olmadıklarını gösterir." Fakat o kola, acımsı tadı olan DEET sürülmüşse, ayaklarındaki reseptörler, hayvanı sokmaya fırsat bulamadan havalanmaya zorlar.[117] Vosshall'ın video kayıtlarında bir sivrisinek eldivenli bir ele konuyor ve elin açıkta kalmış ama üzerine DEET sürülmüş küçük bir bölümüne doğru yürüyor. Deriye değer değmez ayağını geri çekiyor. Dönüp dolaşıyor, tekrar deniyor ve tekrar geri çekiliyor. "Üzücü," diyor Vosshall, sivrisineğe garip bir sempati besleyerek. "Ayrıca gerçekten psikedelik bir şey. Parmaklarımızla tat almanın neye benzediği konusunda hiçbir fikrimiz yok." Böcekler vücutlarının başka yerleriyle de tat alabilir ve bu da genel anlamda sınırlı duyunun kullanım alanını genişletir. Bazıları yumurtlama borusunun üstündeki tat reseptörlerini kullanarak yumurtalarını bırakacak iyi bir yer bulabilir. Bazılarının kanatlarındaki tat reseptörleri, uçarken besin bulmalarında uyarıcı bir alarm işlevi görür.[118] Sinekler, kanatlarındaki bakterilerin tadını alınca temizlenmeye başlar.[119] Kafası kesilmiş sinekler bile böyle yapar.

Doğada en kapsamlı tat duyusu hiç kuşkusuz yayınbalığında görülür.[120] Bu balıklar yüzen bir dil gibidir. Bıyık benzeri duyargalarından [*barbel*] kuyruk ucuna dek, pulsuz gövdelerinin her yeri tat tomurcuklarıyla kaplıdır.[121] Binlerce tat tomurcuğuna dokunmadan yayınbalığını ellemek pek mümkün olmaz. Bu balığı yalarsanız ikiniz de aynı

* Asalak eşekarısının iğnesi İsviçre çakısına benzer. Tat sensörlerinin yanı sıra koku sensörleri, dokunma sensörleri ve biraz da metal içerir. Bir matkap, bir burun ve dil, aynı zamanda bir eldir.

anda birbirinizin tadına bakmış olursunuz.* "Yayınbalığı olsaydım bir çikolata tankının içine atlamak isterdim," diyor John Caprio. "Poponuzla bile tadını alabilirsiniz." Yayınbalıklarında vücudu kaplayan tat tomurcuklarıyla tümyönlü bir duyuya dönüşmüş tat alma duyusu yine de hâlâ besini değerlendirmek için kullanılır. Yayınbalığı et yer; derisinin üzerinde herhangi bir yere bir parça et koyarsanız (ya da etrafındaki suya et suyu dökerseniz), hızla dönüp doğru yeri ısırır. Proteinlerin, dolayısıyla da etin yapıtaşları olan aminoasitlere olağanüstü duyarlıdır.[122]† Ama şekerleri saptamada o kadar başarılı değildir; yani Caprio çikolata fantezisini gerçekleştirebilseydi hayal kırıklığına uğrayacaktı.

Şekeri ve diğer klasik tatları alamama, şaşırtıcı derecede yaygın olup hayvanın beslenmesine göre değişir. Kediler, benekli sırtlanlar ve diğer birçok etçil memeli tatlıya düşkün değildir.[124] Sadece kanla beslenen vampir yarasalar da tatlıya ve umamiye ilgilerini yitirmişlerdir.[125] Yalnızca bambu yiyen pandaların da umamiyi algılaması gerekmez. Buna karşılık, lokmalarındaki her türlü olası toksine karşı uyanık olmak için acımsı tadı algılamalarını sağlayan geniş bir gen kümesine sahiptirler.‡ Koalalar gibi diğer yaprak yeme uzmanlarında da acımsı tat dedektörleri

---

* Bazı yayınbalıklarında zehirli dikenler bulunur; bazılarıysa (sonraki bölümlerde göreceğimiz gibi) elektrik üretebilir. O nedenle hayvan refahı meselesi bir yana, bir yayınbalığını düşünce deneyi dışında yalamanızı kesinlikle tavsiye etmem.

† Aminoasitler birbirinin ayna görüntüsü olan iki farklı biçimde bulunabilir; bunlara L ve D-aminoasitler denir. Doğada esasen L-aminoasitler bulunur; D-aminoasitler hayvanlarda son derece nadirdir. O nedenle Caprio 1990'ların ortalarında yaptığı testler sonucunda, denizde yaşayan bir balık olan sert kafalı yayınbalığındaki [*hardhead catfish*] tat tomurcuklarının neredeyse yarısının D-aminoasitlere tepki verdiğini öğrendiği zaman çok şaşırmış.[123] "Bir hata olduğunu düşünmüştüm," diyor. "Yayınbalığı için önemli olan D-aminoasitler neredeydi?" Sonunda deniz solucanlarının ve deniz taraklarının L-amino asitleri, ayna görüntüsü olan D formuna dönüştürebildiğini öğrendi. Deniz canlılarının D-amino asitleri üretebildiği ancak 1970'lerde keşfedildi. "Yayınbalığıysa bunu yüz milyonlarca yıldan beri biliyordu," diyor Caprio.

‡ Unutmayın ki tat duyusu, nüansların ayrımından çok, kaba bir tespite yöneliktir. Köpeğe kıyasla panda çok daha fazla şeyi acımsı bulabilir ama bunların hepsindeki acımsılığı muhtemelen tutarlı olarak aynı biçimde deneyimler.

daha fazladır.[126] Denizaslanları ve yunuslar gibi avını bütün olarak yutan memelilerse bu reseptörlerin çoğunu kaybetmiştir. Hayvanların tat Umwelt'leri, en sık karşılaştıkları besinlere uygun olarak, tekrar tekrar ve öngörülebilir biçimde genişleyip daralmış ve bu değişiklikler bazen onların kaderini değiştirmiştir.

Tıpkı kediler ve modern etçiller gibi küçük, yırtıcı dinozorlar da muhtemelen şekerin tadını alma becerisini yitirmişti. Kısıtlı damak tatlarını, çoğu bugün bile şekerin tadını alamayan kuşlara aktardılar. Kızılgerdanlar, kargalar, kardinal kuşları, baştankaralar, serçeler, ispinozlar ve sığırcıklar gibi pek çok tür içeren, son derece başarılı bir grup olan ötücü kuşlar bir istisnadır. Evrim biyoloğu Maude Baldwin 2014'te, ilk ötücü kuşlardan bazılarının, normalde umamiyi algılayan bir tat reseptöründeki küçük bir değişiklik sonucu, şekerin tadını yeniden alabilir hale geldiğini gösterdi.[127] Bu değişiklik, çok fazla şeker üreten ve çiçekleri nektarla dolup taşan bitkilerin bulunduğu, okaliptüs ağaçlarının kabuğundan şurubumsu bir maddenin sızdığı Avustralya'da gerçekleşmişti. Şekerin tadını almaya başlayan ötücü kuşlar, Avustralya'da tutunabilmelerini, diğer kıtalara yaptıkları göç maratonlarına dayanabilmelerini, vardıkları yerlerde nektardan zengin çiçekler bulabilmelerini ve şimdi bütün dünyadaki kuş türlerinin yarısını kapsayan devasa bir hanedanlık oluşturacak ölçüde çeşitlenmelerini bu zengin enerji kaynaklarına borçludur belki de. Bu hikâye ispatlanmış olmasa da akıl çelicidir. Milyonlarca yıl önce Avustralya'da yaşayan alelade bir kuş Umwelt'ini genişletmeseydi bugün hiçbirimiz sabah kuş sesleriyle uyanmayacaktık.*

Duyuları, saptadıkları uyaranlara göre farklı gruplara ayırabiliriz. Vomeronazal varyantıyla birlikte koku ve tat duyuları, ortamda bulunan molekülleri saptayan *kimyasal duyulardır*. Bunlar diğerlerinden ayrımış gibi görünen kadim ve evrensel duyulardır; kısmen bu yüzden

* Baldwin ayrıca umami reseptörünün, sinekkuşlarında şekeri saptayan bir reseptöre dönüştüğünü gösterdi.[128] Aynı gen, tıpkı ötücü kuşlarda olduğu gibi ama ondan bağımsız ve neredeyse tamamen farklı bir yoldan değişmiştir. Baldwin, bazı türlerde değişmiş reseptörün umamiyi hâlâ saptayabildiğini söylüyor, yani "bu kuşlar tatlı ve lezzetli arasındaki farkı hissetmiyor olabilir." Soya sosuyla elma suyunu birbirinden ayırt edemediğinizi düşünün.

yolculuğumuzun ilk durağı olarak onları seçtim. Fakat bu duyular, diğerlerinden tamamen farklı değildir. Hatta daha yakından incelendiğinde, en az bir duyuyla beklenmedik şekilde ortak bir yöne sahiptirler.

Bu bölümün başında köpeklerin ve diğer hayvanların, kokuları, koku reseptörleri denen proteinleri kullanarak saptadığını görmüştük. Bunlar, G-proteinine kenetli reseptörler (GPKR'ler) olarak adlandırılan çok daha büyük bir protein grubuna dahildir. Karmaşık adını boş verin, önemli değil. Önemli olan, bu proteinlerin kimyasal sensörler olmasıdır. Hücrelerin yüzeyinde bulunan bu reseptörler, yanlarından geçen özgül molekülleri yakalar. Bu sayede hücreler etraflarındaki maddeleri saptayıp onlara tepki verebilir. Bu süreç geçicidir. İşi biten GPKR'ler yakaladıkları molekülleri ya serbest bırakır ya da ortadan kaldırır. Fakat bir grup GPKR farklı davranır. Opsinler denen bu proteinler özeldir çünkü hedef moleküllerini tutmaya devam ederler ve bu hedef moleküller ışığı soğurur. Görme duyusunun temelini bu süreç oluşturur. Tüm hayvanlar aynı şekilde görür; aslında değişikliğe uğramış kimyasal sensörler olan ışığa duyarlı proteinleri kullanırlar.[129]

Yani bir açıdan bakıldığında, ışığı koklayarak görürüz.

2.

Sonsuz Biçimde Görme

Işık

Bir sıçrayan örümceğe bakıyorum; bana dönük olmadığı halde o da bana bakıyor. Tareti andıran kafasını, iki çifti öne, birer çiftiyse yanlara ve arkaya bakan dört çift göz çevreliyor. Örümcek 360 dereceye yakın bir görme alanına sahip ve tek kör noktası tam arkasında. Parmağımı saat beş yönünde sallayınca kıpırdayan parmak ucumu görüp ona doğru dönüyor. Parmağımı hareket ettirince takip ediyor. Sıçrayan örümcekler "her seferinde dönüp size bakan tek örümcek grubudur," diyor Elizabeth Jakob. Şu anda onun Amherst, Massachusetts'teki laboratuvarındayım. "Çoğu örümcek zamanın büyük bölümünü ağının üzerinde kıpırdamadan oturup bir şey olmasını bekleyerek geçirir. Ama bunlar aktiftir."

İnsan görme duyusuna o kadar bel bağlamış bir tür ki görebilenlerimiz, aktif gözleri aktif zekâyla içgüdüsel olarak bir tutar. Bu örümceklerin kısa ve seri hamlelerinde dünyayı araştıran başka bir meraklı zihin görürüz. Sıçrayan örümcekler söz konusu olduğunda bu, yersiz bir insanbiçimcilik değildir. Haşhaş tanesi kadar beyinleri olmasına rağmen şaşırtıcı derecede zekidirler.* *Portia* türü, avını kovalarken stratejik

* Jakob'a, sıçrayan örümceğin, bir örümcek için ortalamanın üstünde olan zekâsının duyularıyla hangi oranda iç içe geçmiş olduğunu soruyorum. Söylediğine göre, çoğunlukla ağlarındaki titreşimleri hissederek yaşayan örümceklerin, çok fazla enformasyon yorumlaması gerekmiyor. "Gerçekten görme duyusuna bel bağlamış örümceklerin uğraşması gereken enformasyon çok daha karmaşıktır," diyor. "Bu enformasyonu yorumlayabilmenin onlar için kıymetli olduğunu

rotalar planlaması ya da karmaşık avlanma taktikleri arasında esnek geçişler yapmasıyla ünlüdür.[1] Jakob'ın araştırdığı cesur sıçrayan örümcekler [*Phidippus audax*] o kadar yaratıcı değil ama Jakob yine de tutsak memelilere hayvanat bahçesinde sunulan türden bir çevre zenginleştirmesi yapmak için bu örümceklerin bulunduğu ortama çeşitli uyarıcı nesneler koymuş. Bazılarının teraryumlarında canlı renklerde sopaları var. Bir tanesinin kırmızı bir Lego'su olduğu dikkatimi çekiyor. Arkamızı dönünce o Lego'yla ne yapacak acaba diye şakalaşıyoruz.

Serçeparmağımın tırnağından belki biraz daha büyük olan bu örümcek, dizlerindeki beyazlıklar ve turkuaz rengi göz alıcı keliserleri dışında neredeyse simsiyah. Beklenmedik ölçüde şirin. Tıknaz gövdesi, kısa bacakları, koca kafası ve iri gözleriyle çocuksu görünüyor ve bebekleri ya da köpek yavrularını sevilesi kılan, aynı derin psikolojik eğilimi harekete geçiriyor. Fakat bu boyutlarda evrilmesinin sebebi, karşısındakinde empati uyandırmak değil. Bu örümcek kısacık bacaklarıyla çok yükseğe sıçrayabiliyor. Pusu kuran örümceklerden farklı olarak sıçrayan örümcekler avlarının peşine düşüp üzerine atlarlar. Ayrıca diğer örümcekler dünyayı titreşimlerle ve dokunarak hissederken sıçrayan örümcekler görme duyusuna güvenirler.[2] O nedenle sekiz göz, kocaman kafalarının yarısından fazlasını işgal eder. Umwelt'leri bize en yakın olan örümceklerdir. Bu benzerlikten ötürü aramızda bir yakınlık hissediyorum. Ben örümceğe bakıyorum, o da bana bakıyor ve tamamen farklı iki tür olarak hâkim duyumuzla bağlanmış, birbirimizi seyrediyoruz.

Meslektaşlarından birinin "gözlerin tanrısı" olarak tanımladığı Britanyalı müteveffa nörobiyolog Mike Land, sıçrayan örümceklerin görme duyusuyla ilgili çalışmaların öncülüğünü yaptı.[3] 1968'de örümcekler için geliştirdiği oftalmoskopla, art arda bazı görüntülere bakarlarken bu hayvanların retinalarını gözlemledi.[4] Jakob ile meslektaşları, Land'in tasarımını daha da geliştirdiler; ziyaretim sırasında içine bir sıçrayan örümcek yerleştirdikleri cihaz şu anda hayvanın merkezî gözlerini hedef almış durumda. Dümdüz ileriye bakan bu gözler, dört

düşünmemek elde değil ve bu da evrimin onları giderek daha ileri bilişsel becerilere doğru itmesini sağlayan iyi bir fırsat gibi görünüyor. Yine de bilemiyorum. İnsan olduğumuz için görmeye ağırlık veren kendi önyargımızı da hesaba katmalıyız."

çift göz arasında hem en büyük hem de en keskin olanlardır. Bu gözler sadece birkaç milimetre çapında olduğu halde güvercinlerin, fillerin ya da küçük köpeklerin gözleri kadar net görebilir. Her bir göz, önde merceğin, arkadaysa retinanın bulunduğu bir tüpten oluşur.* Mercek sabittir ama örümcek, tüpün geri kalan kısmını kafasının içinde döndürerek etrafına bakabilir. (Bir feneri baş kısmından kavradığınızı ve sapını hareket ettirerek ışığın hedefini değiştirdiğinizi düşünün.)† Göz takip cihazının içindeki dişi örümcek de tam olarak aynısını yapıyor. Vücudu hareketsiz. Gözleri de hareketsiz görünüyor. Ama ekranda retinalarının hareket ettiğini görebiliyoruz. "Gerçekten de etrafına bakınıyor," diyor Jakob.

Nedeni tam olarak bilinmemekle birlikte merkezî gözlerin retinaları bumerang şeklindedir. Başlangıçta Jakob'ın ekranında iki retina birbirinden ayrı görünüyor (> <). Ama Jakob örümceğe siyah bir kare gösterince retinalar birbirine yaklaşıp kesişerek bir çapraz oluşturuyorlar (><). Kare hareket ettikçe retinalar takip ediyor. Fakat bir süre sonra örümcek ilgisini yitirince retinalar birbirinden uzaklaşıyor. Jakob karenin yerine bir cırcırböceği silueti gösterince retinalar yeniden birbirine yaklaşıyor. Bu kez görüntünün üzerinde dans ediyor, gözlerimizin bir manzara karşısında yaptığı gibi hızlı hareketlerle böceğin antenleri, gövdesi ve bacakları üzerinde geziniyorlar. Belki de örümcek neye baktığını anlamasına yardımcı olacak belli açılar aradığı için retinaları bazen saat yönünde bazen de ters yönde birlikte dönüyor. Mike Land "Hissedebilen ve özellikle de evrimsel açıdan kendinden bu denli uzak olan bir yaratığın hareket eden gözlerinin içine bakmak çok heyecan

---

* Her merkezî gözde, biri üstte diğeri altta olmak üzere aslında iki mercek bulunur. Üst mercek ışığı toplar ve odaklarken, alttaki ışığı dağıtır. Bu düzenleme, görüntüleri örümceğin retinasına ulaşmadan büyüttüğü için bu minicik hayvanlar küçük köpekler kadar keskin bir görüşe sahiptir. Galileo'nun, uzaktaki cisimleri inceleyebilmek için 1609'da kullanmaya başladığı, her iki ucunda mercek bulunan borulardan oluşmuş teleskoplar da aynı şekilde çalışır. Galileo farkında değildi ama aslında milyonlarca yıllık evrim sürecinde geliştirdiği bu yapıyı berrak gecelerde ayı görmek için kullanabilen sıçrayan örümceklerden istemeden de olsa fikir çalmıştı.

† Sıçrayan örümcek yavruları saydamdır. İyi bir ışık altında göz tüplerinin kafalarının içinde nasıl hareket ettiğini görebilirsiniz.

verici ama aynı zamanda tuhaf bir deneyimdir," diye yazmıştı.[5] Tamamen katılıyorum. İnsanlarla sıçrayan örümcekler en az 730 milyon yıllık evrim süreciyle birbirinden ayrılmış olduğundan bu denli farklı bir yaratığın davranışlarını yorumlamak zor. Fakat Jakob'ın ekranında bir örümceğin dikkatini odakladığını ya da ilgisini kaybettiğini görebiliyorum. Gözlemleyen örümceği gözlemleyebiliyorum. Bakışlarını seyrederken onun zihnine mümkün olduğunca yaklaşabiliyorum. Aramızdaki pek çok benzerliğe rağmen, onun görme biçiminin benimkinden ne kadar farklı olduğunu anlayabiliyorum.

Her şeyden önce, benden daha çok gözü var. Merkezî çift daha keskin ve hareketli olsa da görüş açısı çok dardır. Örümceğin bütün göz varlığı bu merkezî çiftten ibaret olsaydı etrafını karanlık bir odayı tarayan iki fenerin aydınlattığı alanlar gibi görürdü. Merkezî çiftin her iki yanındaki ikincil gözler çok daha geniş bir görme alanı sağlayarak bu eksikliği telafi eder. İkincil gözler hareketsiz olmalarına rağmen hareket ileri derecede hassastırlar. Örümceğin önünde bir sinek vızıldayacak olsa ikincil gözler sineğin yerini hemen tespit eder ve merkezî gözlere nereye bakmaları gerektiğini söyler. Asıl garip olansa şu: İkincil gözler kapatılırsa örümcek hareketli cisimleri takip edemez.[6]

Bunun nasıl olabileceğini hayal bile edemiyorum. Bu sözcükleri yazarken gözlerimin en keskin kısmını ekranımda beliren harflere odaklıyorum. Aynı anda çevresel görüş alanımda kalemimin siyah siluetini, oturma odasında yaramazlık yapmak için fırsat kollayan yavru korgimi görebiliyorum. Keskin görme ve hareketi saptama, bana birbirinden ayrılamaz iki şeymiş gibi geliyor. Oysa sıçrayan örümcekler ikisini öyle güzel ayırmış ki bu iki işi *farklı göz grupları* yapıyor. Merkezî gözler desenleri ve biçimleri tanıyor ve renkli görüyor. İkincil gözlerse hareketleri izliyor ve dikkati doğru yere yönlendiriyor. Farklı işler için farklı gözler kullanılıyor ve her göz grubunun, örümceğin beyninde kendi bağlantıları bulunuyor.* Sıçrayan örümcekler bize, gören diğer canlılarla ortak bir görsel gerçekliğimiz olduğunu ama o gerçekliği tamamen farklı biçimlerde deneyimlediğimizi hatırlatıyor. "Başka gezegenlerde

* Peki ya diğer iki çift göz? Çiftlerden biri, görünüşe göre örümceğin arkasındaki hareketi saptar. Çok küçük olan diğer göz çiftinin işleviyse çok iyi bilinmiyor.

uzaylı aramaya hiç gerek yok," diyor Jakob. "Dünyayı bütünüyle farklı yorumlayan hayvanlar yanı başımızda yaşıyor."

İki gözümüz var. Bu gözler başımızda ve boyutları aynı. İkisi de öne bakar. Bu özelliklerin hiçbiri norm değildir ve hayvanlar âleminin geri kalanına şöyle bir baktığımızda gözlerin, sahipleri kadar çeşitli olduğunu görürüz. Bir hayvanın sekiz gözü de olabilir yüzlerce gözü de. Dev kalamarın gözleri futbol topu büyüklüğünde, peri sineklerinin [*fairy wasps*] gözleriyse bir amip çekirdeği kadardır.[7] Kalamar, sıçrayan örümcekler ve insanlarda birbirinden bağımsız olarak, tek bir merceğin ışığı tek bir retina üzerinde odakladığı, fotoğraf makinesine benzer gözler evrilmiştir.[8] Böcekler ve kabuklular, ışığı toplayan pek çok ayrı birimden (ommatidyum) oluşan petek gözlere sahiptir. Hayvanların gözleri çift odaklı ya da asimetrik olabilir.[9] Mercekleri proteinden ya da minerallerden yapılmış olabilir.[10] Gözler ağızda, kollarda ya da zırhın üzerinde bulunabilir. Bizim gözlerimizin yapabildiği her şeyi ya da sadece birkaçını yapabilir.

Gözlerdeki bu çeşitlilik beraberinde baş döndürücü bir görsel Umwelt potpurisi getirir. Bazı hayvanlar belli bir mesafede net detayları görebilir, bazılarıysa flu ışık ve gölge lekelerinden başka bir şey göremez. Bazıları bize karanlık gelen ortamda mükemmel görürken, bazıları aydınlığa çıkar çıkmaz kör olur. Bazılarının görmesi ağır çekime, bazılarınınki zaman aralıklı çekime benzer. Aynı anda bazıları iki yönde, bazıları her yönde görebilir. Görme duyarlılıkları gün içinde artıp azalabilir. Yaşlandıkça Umwelt'leri değişebilir. Jakob'ın meslektaşı Nate Morehouse, sıçrayan örümceklerin kendilerine ömür boyu yetecek sayıda ışık dedektörü hücreyle dünyaya geldiğini, bu hücrelerin yaşla birlikte büyüdüğünü ve hassaslaştığını gösterdi.[11] "Her şey giderek parlaklaşır," diyor Morehouse. Bir sıçrayan örümcek için yaşlanmak, "güneşin doğuşunu seyretmeye benzer."

Sönke Johnsen, kitabı *The Optics of Life*'ın girişinde, görme "ışıkla ilgilidir; o nedenle belki de ışığın ne olduğuyla başlamalıyız," diye yazar.[12] Ardından, hayranlık uyandıran bir açıksözlülükle şöyle der: "Hiçbir fikrim yok." Sürekli onunla çevrili olsak da ışığın gerçek doğası sezgisel değildir. Fizikçilerin iddiasına göre ışık hem elektromanyetik dalga

hem de foton olarak adlandırılan parçacıklar halinde var oluyor. Bu ikili doğanın ayrıntıları bizi ilgilendirmiyor. Önemli olan, her iki tezahürün de canlıların açıkça algılayabileceği bir şey olmamasıdır. Biyolojik açıdan bakıldığında belki de ışıkla ilgili en harika şey, onu hissedebiliyor olmamızdır.

Bir sıçrayan örümceğin, bir insanın ya da başka bir hayvanın gözlerini incelerseniz fotoreseptör dediğimiz ışık dedektörü hücreler bulursunuz. Bu hücreler, türler arasında çarpıcı bir çeşitlilik gösterebilir ama hepsinin ortak bir özelliği vardır: Bir protein grubu olan opsinleri içerirler. Görebilen her hayvan, opsinler sayesinde görür.[13] Opsinler, genellikle A vitamini türevi olan, kromofor denen bir moleküle sımsıkı sarılarak çalışır. Kromofor, tek bir ışık fotonunun enerjisini soğurur ve bunu yaptığı anda biçim değiştirir. Eğilip bükülmesi, birlikte çalıştığı opsini de yeniden biçimlenmeye zorlar. Opsinin dönüşümü bir kimyasal tepkimeler zinciri başlatır ve bunun sonucunda oluşan elektriksel sinyal, nöron boyunca ilerler. Böylece ışığı algılarız. Kromoforu bir arabanın anahtarı, opsiniyse arabanın kontağı olarak düşünün. İkisi birbiriyle uyumludur; ışık anahtarı çevirince görme motoru çalışmaya başlar.

Binlerce farklı hayvan opsini vardır ama bunların hepsi birbiriyle akrabadır.* Bu durum bir paradoks yaratır. Madem bütün görme biçimleri aynı proteinlere bağlı ve madem bu proteinlerin hepsinin işi ışığı saptamak, o halde gözler niye bu kadar çeşitli? Bu sorunun yanıtı, ışığın özelliklerinde gizlidir. Yeryüzündeki ışığın çoğu güneşten geldiğine göre, ışığın varlığı sıcaklığı, günün hangi zamanı olduğunu ya da suyun derinliğini dolaylı yoldan anlatabilir. Cisimlerden yansıyan ışık, düşmanları, eşleri ve barınakları ortaya çıkarır. Katı engeller dümdüz ilerleyen ışığın yolunu kesince, müzevir gölgeler ya da siluetler yaratır. Işık, Dünya ölçeğinde mesafeleri bir

* Evrim biyoloğu Megan Porter 2012'de, farklı türlerde bulunan 900 civarında opsini karşılaştırdı ve hepsinin aynı atadan geldiğini doğruladı.[14] Orijinal opsin ilk hayvanlardan birinde ortaya çıkmıştı ve ışığı o kadar verimli yakalıyordu ki evrim hiçbir zaman ona daha iyi bir alternatif üretemedi. Onun yerine bu atasal protein geniş bir opsin ağacı ailesi oluşturacak şekilde çeşitlendi. Porter bu ağacı, dalları tek bir noktadan dışarıya doğru uzanan bir daire şeklinde çiziyor. Çizimin kendisi de dev bir göze benzer.

anda katedebildiğinden hızlı ve uzun menzilli bir bilgi kaynağıdır. Görme biçimlerinin bu denli çeşitli olmasının sebebi, ışığın pek çok farklı açıdan bilgi vermesi ve hayvanların ışığı pek çok farklı nedenle duyumsamasıdır.[15]

Biyolog Dan-Eric Nilsson, evrim sürecinde gözlerin giderek karmaşıklaşan dört evrede geliştiğini söylüyor.[16] İlk evre sadece fotoreseptörleri, yani ışığı saptamaktan başka bir şey yapmayan hücreleri kapsar. Denizanasının akrabası olan hidra, fotoreseptörlerini kullanarak yakıcı hücreler taşıyan dokunaçlarını loş ışıkta daha kolay fırlatabilir;[17] bunu belki de yakıcı hücreleri, avın daha bol olduğu gece saatlerinde ya da yakınından geçen hedefin gölgesini hissettiğinde kullanmak için yapar. Zeytin deniz yılanının [*olive sea snake*] fotoreseptörleri kuyruğunun ucunda bulunur ve hayvan ışık kaynağıyla karşılaştığı zaman kuyruğunu geri çeker.[18] Ahtapotlar, mürekkepbalıkları ve diğer kafadanbacaklıların derisini kaplayan fotoreseptörler, renk değiştirme becerilerini de kontrol ediyor olabilir.[19]

İkinci evrede fotoreseptörler koyu renkli bir pigment ya da belli açılardan gelen ışığın önünü kesen başka bir bariyer tarafından korunur. Korumalı fotoreseptörler ışığı saptamanın yanı sıra, hangi yönden geldiğini de anlayabilir. Bu yapılar bu haliyle bile o kadar basittir ki çoğu biliminsanı tarafından gerçek göz olarak kabul edilmez ama yine de sahibinin işine yarar. Dahası herhangi bir yerde karşımıza çıkabilirler. Örneğin Asya kırlangıçkuyruğunun üreme organlarında fotoreseptörler bulunur.[20] Erkek kelebek bu hücrelerin yardımıyla penisini dişinin dölyoluna yönlendirir ve dişi de aynı hücreleri kullanarak yumurtlama borusunu bitkinin yüzeyine yerleştirir.

Nilsson'a göre üçüncü evrede, korumalı fotoreseptörler kümeler oluşturur. Bu tip gözleri olan canlılar farklı yönlerden gelen ışık hakkındaki enformasyonu birleştirip dış dünyaya dair görüntüler oluşturabilir. Birçok biliminsanına göre bu, ışık saptamanın gerçek anlamda görmeye dönüştüğü, basit fotoreseptörlerin hakiki göz haline geldiği ve hayvanların sahiden de görebildiğini söyleyebileceğimiz aşamadır.*

* Bu ayrım üzerinde evrensel bir fikir birliği yoktur ve bazı araştırmacılar ikinci evre gözü de (koruyucu pigmentle birlikte bir fotoreseptör) gerçek göz kabul eder.

Başlangıçta bulanık ve grenli olan görme yalnızca barınak bulma ya da yakındaki şekilleri seçme gibi kaba işler için uygundur. Fakat mercek gibi odaklayıcı unsurların eklenmesiyle hayvanların görüşü netlik kazanır ve Umwelt'leri görsel ayrıntılarla zenginleşir. Nilsson'ın dördüncü evresi, yüksek çözünürlüklü görmedir. Görmenin bu biçimi, ilk ortaya çıktığında hayvanlar arasındaki etkileşimleri güçlendirmiş olmalı. Böylece çatışmalar ve kur davranışları, dokunma veya tat duyularının elverdiğinden daha uzak mesafelerde ve koku duyusunun elveremediği hızlarda gerçekleşebiliyordu. Yırtıcılar artık peşine düştükleri avı (ya da av hayvanları, peşlerinden koşan yırtıcıları) daha uzaktan fark edebiliyordu. Kovalamaca başlamıştı. Hayvanlar artık daha büyük, daha hızlı ve daha hareketliydi. Koruyucu kalkanlar, dikenler ve kabuklar gelişti. Yüksek çözünürlüklü görmenin yükselişi, yaklaşık 541 milyon yıl önce hayvanlar âleminin neden çarpıcı biçimde çeşitlenerek günümüzde yaşayan başlıca grupları oluşturduğunu açıklayabilir. Kambriyen patlaması olarak adlandırdığımız bu evrimsel yenilik furyasını başlatan kıvılcımlardan biri, dördüncü evre gözlerin gelişmesi olabilir.[21]

Nilsson'ın dört evreli modeli, karmaşık modern gözlerin nasıl evrildiğinden emin olamayan Charles Darwin'in endişesine de yanıt verir. "(...) onca eşsiz düzeneği bünyesinde barındıran göz gibi bir organın, doğal seçilim yoluyla ortaya çıkmış olabileceği varsayımının kulağa son derece abes geldiğini itiraf etmeliyim," diye yazmıştı *Türlerin Kökeni*'nde.[22] "Ancak kusursuz ve karmaşık bir göz ile kusurlu ve basit bir göz arasında, her biri sahibine yarar sağlayan çok sayıda kademe bulunduğu gösterilirse (...) kusursuz ve karmaşık bir gözün doğal seçilim yoluyla oluşabileceğine inanmak, hayal gücümüzü aşıyor olsa da benim mantığıma göre gerçek bir sıkıntı yaratmamaktadır." Darwin'in hayal ettiği kademeler gerçekten de var: Hayvanlarda, basit fotoreseptörler ile keskin gözler arasında akla gelebilecek her türlü ara kademe bulunur. Ayrıca farklı hayvan gruplarında, yapıtaşı olarak aynı opsinlerin kullanıldığı çeşitli gözler tekrar tekrar ve birbirinden bağımsız olarak evrildi. Sadece denizanasında bile ikinci evre gözler en az dokuz, üçüncü evre

gözlerse az iki kez evrildi.[23] Gözler, evrim teorisine darbe vurmak şöyle dursun, onun en iyi örneklerinden birini oluşturur.*

Ne var ki Darwin karmaşık gözlere kusursuz, daha basit olanlara kusurlu derken yanılıyordu. Dördüncü evre göz, evrimin ulaşmaya çalıştığı Platonik bir idea değildir. Ondan önce ortaya çıkmış daha basit gözler, sahiplerinin gereksinimlerini karşılamaya devam etmektedir. "Gözler kötüden mükemmele doğru evrilmedi," diyor Nilsson üstüne basa basa. "Birkaç basit iş yapmaktan karmaşık işleri mükemmel biçimde gerçekleştirmeye doğru evrildiler." Giriş bölümünde gördüğümüz gibi, denizyıldızının gözleri kollarının ucundadır.[25] Bu gözler renk, detay ya da hızlı hareketleri göremez ama görmesi de gerekmez zaten. Denizyıldızının mercan resifinin güvenli ortamına ağır ağır geri dönebilmesi için sadece büyük nesneleri tespit etmesi gerekir. Onun bir kartalın keskin gözlerine, hatta sıçrayan örümceğinki gibi gözlere dahi ihtiyacı yoktur. Görmesi gerekeni görür.† Başka bir hayvanın Umwelt'ini anlamanın ilk adımı, duyularını ne *için* kullandığını anlamaktır.

Örneğin primatlarda büyük ve keskin gözler, muhtemelen ağaçlarda yaşayan ve dalların üzerinde konuşlanan böcekleri

---

* Nilsson ve Susanne Pelger, 1994'te üçüncü evre basit gözün dördüncü evre keskin göze evrimiyle ilgili bir simülasyon hazırladılar.[24] Simülasyon küçük, yassı bir fotoreseptör grubuyla başlar. Hücre grubu her kuşakta yavaş yavaş kalınlaşıp kavislenerek kadeh şeklini alır. İşlevi giderek gelişen kaba bir mercek kazanır. Gözün her kuşakta en kötü ihtimalle yüzde 0,005 oranında bir ilerleme kaydettiğini ve her kuşağın ömrünün bir yıl olduğunu varsayarsak bulanık gören üçüncü evre gözün bizdekine benzer bir göze dönüşmesi sadece 364 bin yıl sürer. Bütün bir evrim sürecini düşündüğümüzde bu kadarlık zaman kısacık bir âna tekabül eder.

† Gelişmiş gözler gelişmiş canlılarda, basit gözler basit canlılarda bulunur gibi bir kural yok. Bazı mikroplar tek bir hücreden meydana geldiği halde, hayret verici derecede karmaşık bir gözü taklit eder. Tatlı suda yaşayan bir bakteri olan *Synechocystis*'i ele alalım.[26] Bakterinin küresel hücresine bir taraftan vuran ışık diğer tarafta odaklanır. Bakteri ışığın ne taraftan geldiğini algılayıp o yöne doğru hareket eder. Canlı bir mercek gibi davranır ve hücre sınırları bir bütün olarak retina işlevi görür. Tek hücreli bir alg grubu olan warnowiid'ler de canlı bir göze benzer ve her hücrenin bir merceği, irisi ve retinayı temsil eden bileşenleri vardır.[27] Ne gördükleri, hatta görüp görmedikleri bile kesin olarak bilinmiyor.

yakalayabilmek için gelişti. Keskin görme yetimizi onlardan miras aldık ve görebilen insanlar artık bu beceriyi hünerli parmaklarını yönlendirmek, anlam yükledikleri sembolleri okuyabilmek ve yüz ifadelerinin nüanslarında saklı ipuçlarını değerlendirmek için kullanıyor. Gözlerimiz gereksinimlerimize uygundur. Ayrıca bize, diğer hayvanların çoğunun ortak olamadığı olağanüstü bir Umwelt kazandırır.

Hayvanlarda görme duyusunu araştıran Amanda Melin, 2012'de, hayvanların desenlerini araştıran Tim Caro'yla tanışıp da laf lafı açınca, söz doğal olarak zebralara gelmişti.

Caro, zebraların neden böylesine dikkat çekici siyah-beyaz desenleri olduğunu uzun zamandan beri merak eden biyologlar zincirinin yeni bir halkasıydı.[28] Melin'e, ilk ve öne çıkan varsayımlardan birine göre çizgilerin, sezgilere aykırı olsa da kamuflaj amaçlı olduğunu söyledi. Çizgiler zebraların dış hatlarını belirsizleştirerek ya da ağaçların dikey gövdeleri arasında dikkat çekmemelerini sağlayarak veya koşarken kafa karıştırıcı bir bulanıklık yaratarak aslan ve sırtlan gibi yırtıcıların gözlerini yanıltıyordu. Melin kuşkuluydu. "Şaşkın şaşkın bakıyordum," diyor Melin. "'Etçillerin çoğunlukla geceleyin avlandığını ve görme keskinliğinin insandakine kıyasla çok daha kötü olduğunu sanıyordum. Bu yüzden çizgileri muhtemelen göremezler,' dedim. Tim şöyle karşılık verdi: *'Ne?'*"

İnsanlar, görsel detayları çözme konusunda hemen hemen bütün hayvanları gölgede bırakır. Melin, görme yetimizin istisnai keskinliği sayesinde, zebranın çizgilerini pek az canlıya nasip olan bir netlikte gördüğümüzü fark etti. Caro'yla birlikte, mükemmel görebilen insanların siyah-beyaz şeritleri, güneşli bir günde yaklaşık 180 metre uzaktan ayırt edebildiğini hesapladı.[29] Bu mesafe aslanlarda 80, sırtlanlardaysa 45 metredir. Dahası, bu yırtıcıların asıl avlanma zamanı olan gündoğumu ve günbatımında mesafe yarıya iner. Melin haklıydı: Şeritler kamuflaj işlevi görüyor olamazdı çünkü yırtıcı hayvanlar onları sadece yakın mesafeden tanıyabilir ki bu noktada zebraları zaten duyabildikleri ve kokularını alabildikleri neredeyse kesindir. Daha uzak mesafelerde, şeritler

kaynaşıp tekdüze bir gri oluşturur. Zebra, avlanan bir aslana çoğu zaman bir eşek gibi görünür.*

Bir hayvanın görme keskinliği derece başına döngü ("*cycles per degree*", cpd) cinsinden ölçülür[31] ve işe bakın ki bu, zebranın çizgileriyle ilgili duruma benzer bir kavramdır. Kolunuzu öne uzatıp başparmağınızı yukarı kaldırın. Tırnağınız, etrafınızı saran 360 derecelik alanda, kabaca 1 derecelik bir görme alanını temsil eder. O tırnağa çizdiğiniz 60-70 çift ince siyah-beyaz şeridi birbirinden ayırt edebilmeniz gerekir. O halde bir insanın görme keskinliği 60-70 cpd'dir. Güncel rekor 138 cpd ile, Avustralya'da yaşayan kama kuyruklu kartala aittir.[32†] Hayvanlar âlemindeki en ince fotoreseptörlerden olduğu için bunlar kartalın retinasında sıkıca paketlenmiş halde bulunabilir. Bu ince hücreler sayesinde kartal, dünyayı, piksel sayısı bizimkinin iki katından fazla olan bir ekranda görür. Bir sıçanı bir buçuk kilometre öteden fark edebilir.

Ancak yalnızca kartalların ve diğer alıcı kuşların görüşü bizimkine kıyasla belirgin ölçüde daha keskindir. Yüzlerce türe ait ölçümleri bir araya getiren duyu biyoloğu Eleanor Caves'in sonuçlarına göre insan, görme keskinliği açısından diğer türlerin hemen hepsini geride bırakır.[34] Yırtıcı kuşlar dışında yalnızca primatlar bizim standartlarımıza yaklaşır. Ahtapotlar (46 cpd), zürafalar (27 cpd), atlar (25 cpd) ve çitalar (23 cpd) da oldukça iyidir. Aslanın görme keskinliği 13 cpd, yani insanlarda yasal körlük sınırı olarak kabul edilen 10 cpd'nin biraz üstündedir. Kuşların yarısı (şaşırtıcı olmakla beraber sinekkuşları ve peçeli baykuşlar da), balıkların çoğu ve bütün böceklerde görme keskinliği bu eşik değerin altında kalır. Bal arısında görme keskinliği 1 cpd'dir.[35] Öne uzattığınız başparmağınızın tırnağı arının görsel

---

* Öyleyse zebralar neden çizgili? Caro'nun buna net bir yanıtı var: kan emici sinekleri uzak tutmak için.[30] Afrika at sinekleri ve çeçe sinekleri atlar için ölümcül bazı hastalıklar taşır ve kısa kıllı postlarından ötürü zebralar özellikle savunmasızdır. Fakat çizgiler her nedense hayvanı ısıran haşeratı şaşırtır. Caro, gerçek zebraların ve zebra gibi çizgili post giydirilmiş atların filmini çekerek, sineklerin hayvanlara yaklaştığını ama üzerlerine konmayı beceremediklerini gösterdi. Bunun sebebi bilinmiyor.

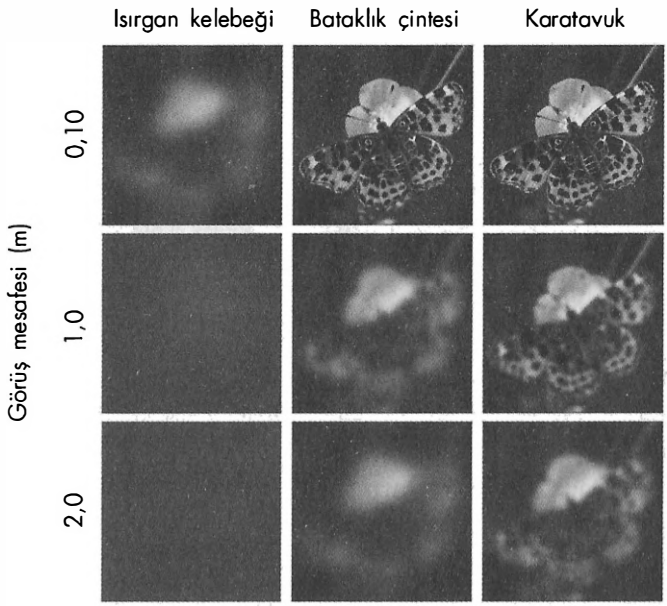
† Sık atıfta bulunulan, 1970'lerde yapılmış bir çalışmada Amerika kerkenezinin görme keskinliğinin 160 cpd olduğu ileri sürülmüştü ama aynı kuşla ilgili diğer çalışmalarda insanlardakine denk, çok daha düşük değerler bulundu.[33]

dünyasında kabaca bir piksele karşılık gelir ve o tırnaktaki bütün detaylar tekdüze bir karaltı gibi görünür. Böceklerin yüzde 98'inin görüşü daha da kabadır. "İnsanlar acayip," diyor Caves. "Hiçbir duyu modalitesinin zirvesinde değiliz ama görme keskinliği konusunda muhteşemiz." Keskin görme paradoksal olarak diğer Umwelt'leri anlamamızı zorlaştırır çünkü "biz görebiliyorsak onlar da görebilir, bizim için göz alıcı olan bir şey onların da dikkatini çeker diye düşünüyoruz," diyor Caves. "Oysa hiç de öyle değil."

Caves de bu algısal önyargının tuzağına bizzat düşmüş. Caves balıkların ölü derisini ve asalaklarını ayıklayan temizlikçi karidesler üzerinde çalışıyor. "Bu karidesler mercan resiflerinde yaşayan rengârenk balıkları temizler; o yüzden görme yetilerinin makul düzeyde olduğunu düşünmüştüm," diye anlatıyor. Ama öyle değil. Karidesin canlı mavi beneklerini ve sallayıp durduğu bembeyaz antenlerini, müşterisi olan balık görebilir ama karidesin kendisi göremez. Temizlikçi karidesin o güzel desenleri, çok yakından bakarken bile kendi Umwelt'inin bir parçası değildir. "Muhtemelen kendi antenlerini dahi göremiyorlar," diyor Caves.

Birçok kelebeğin kanatlarında, zehirli olduklarına dair yırtıcı hayvanlara uyarı niteliğinde karmaşık desenler bulunur. Bazı biliminsanları, kelebeklerin birbirlerini bu desenlerden tanıdığını ileri sürer ama kelebekler yeterince keskin bir görüşe sahip olmadığına göre bu pek mümkün değildir. Karatavuk, ısırgan kelebeğinin turuncu kanatlarındaki siyah benekleri görebilir ama başka bir ısırgan kelebeği muhtemelen turuncu bir karaltıdan başka bir şey göremez. Kelebeklere, temizlikçi karideslere ve zebralara hep yanlış gözlerle, kendi gözlerimizle bakmışızdır.

Madem hayvanlarda girift desenler bu denli sık görülüyor, o halde keskin gözler niye daha yaygın değil? Çünkü bazı durumlarda gözlerin geçmişi, bugünkü durumunu kısıtlar. Düşük çözünürlüğün laneti petek gözün yapısına sinmiş, yola böyle bir gözle çıkan böcekler ve kabuklular şimdi o çözünürlükte sıkışıp kalmıştır. Avcı sinekler 3,7 cpd ile idare eder ama sınır budur zaten.[36] Sineğin gözünün insanınki kadar keskin olması için bir metre genişliğinde olması gerekir.[37]



Farklı türlerin gözünden ve çeşitli mesafelerden ısırgan kelebeğinin görüntüsü

Keskin gözler için ağır bir bedel ödenir. Kama kuyruklu kartalda olduğu gibi, daha küçük ve daha yoğun paketlenmiş fotoreseptörlere sahip hayvanlar daha keskin bir görüşe ulaşabilir. Fakat bu durumda reseptörün duyarlılığı, daha küçük bir alandan ışık topladığı için azalır. Duyarlılık ve çözünürlük özellikleri birbirine terstir. Hiçbir göz ikisinde birden mükemmelleşemez. Kartal, gün ışığında çok uzaktaki bir tavşanı fark edebilir ama güneş batarken görme keskinliği hızla azalır. (Gececil kartal yoktur.) Tersine, aslan ve sırtlanlarda çözünürlük uzaktaki bir zebranın çizgilerini ayırt etmeye yetmeyebilir ama görme duyarlılığı gece bir zebra avlamalarına yetecek kadar iyidir. Onlar ve diğer birçok hayvan için duyarlılık keskinlikten önce gelir. Her zaman olduğu gibi, gözler sahiplerinin gereksinimlerine göre evrilir. Kimi hayvanların net görmesi gerekmez. Hatta bazı hayvanların görmesi bile gerekmez.

***

Meslek hayatını deniztaraklarıyla empati kurarak geçireceği, Daniel Speiser'ın aklına hiç gelmemişti. 2004'te lisansüstü eğitimine başladığında, o da çoğu insan gibi deniztaraklarına bakarken "lop et parçaları" görüyordu. Fakat bu iştah açıcı, kızarmış et parçaları aslında deniztaraklarının kabuklarını kapamak için kullandıkları kaslardır. Canlı bir deniztarağına tepeden tırnağa incelerseniz çok farklı bir hayvan görürsünüz... ve o hayvan da sizi görür. Deniztarağının yelpaze şeklindeki iki kabuğunun iç kenarında gözler dizilidir.[38] Bazı türlerde onlarca, bazılarındaysa 200 kadar göz bulunur. *Körfez deniztarağı* [*bay scallop*] türü deniztarağında gözler fosforlu yabanmersinleri gibi görünür. Speiser bu hayvanları "hem komik hem korkutucu hem de çekici" bulduğunu söylüyor.

Kara midye ve istiridye gibi diğer çiftkabukluların gözleri olmadığı halde deniztarağının gözlerinin olması yeterince tuhaf değilmiş gibi, Mike Land 1960'larda bu gözlerin karmaşık bir yapısı olduğunu gösterdi.[39] Her göz hareketli bir dokunacın ucunda bulunur ve küçük birer gözbebeğine sahiptir: "Hepsini aynı anda açılıp kapanırken görmek çılgınca ve tüyler ürperticidir," diyor Speiser. Işık gözbebeğinden geçip gözün arkasına çarptıktan sonra küresel bir ayna tarafından yansıtılır. Ayna, ışığı deniztarağının retinalarına odaklayan düzenli dizilmiş kare şeklinde kristallerden oluşur. Retina değil, retinalar diyorum çünkü her gözün iki retinası vardır ve bunlar iki hayvanın retinası birbirinden ne kadar farklı olabilirse o kadar farklıdır.* İki retinanın arasında, küçük nesneleri saptamaya yetecek uzamsal çözünürlüğü sağlayan binlerce fotoreseptör bulunur. "Optik mekanizmaları gerçekten de iyidir," diyor Speiser.†

---

* Hayvanlarda biri siliyer, diğeri rabdomerik olarak adlandırılan iki ana fotoreseptör bulunur. Her ikisi de opsinleri kullanır ama çok farklı biçimlerde işlev görür. Biliminsanları siliyer reseptörlerin sadece omurgalılarda, rabdomerik olanlarınsa sadece omurgasızlarda bulunduğunu düşünüyordu. Ama bu doğru değil: Bu iki reseptör her iki grupta da bulunur. Deniztarağında da öyledir; hayvanın retinalarından biri siliyer, diğeri rabdomerik fotoreseptörlerle doludur.[40] Neden? Emin değiliz ama görünüşe göre retinalardan biri hareket eden cisimleri tespit etmek, diğeri habitat seçmek için kullanılıyor.

† Deniztarağının gözleri mükemmel değildir. Işık göze girdiğinde, ayna tarafından yönü değiştirilip odaklanmadan önce retinadan geçmek zorundadır. Retina bu ışığı iki aşamada soğurur: birincisi, ışığın odaklanmamış haldeki ilk geçişi sırasında ve ikincisi, odaklandıktan sonra. Yani göz, flu bir arkaplan üzerinde odaklanmış bir görüntü görür.

Peki ama *neden*? Deniztarağı tehlike altındayken, kabuğunu paniğe kapılmış bir kastanyet gibi açıp kapayarak uzaklaşabilir. Hareket ettiği bu ender anlar dışında çoğunlukla deniz tabanında oturup sudaki yenebilir parçacıkları süzer. Sönke Johnsen'e göre onlar "muhteşem midyeler." Onlarca, hatta yüzlerce gözlerinin olması bir yana, göz yapısının niye bu denli karmaşık olması gerekir? Deniztarağı görme duyusunu ne için kullanır? Speiser, bu sorunun yanıtını bulmak için Deniztarağı TV adlı bir deney tasarladı. Kabuklarından minik koltuklara bağladığı deniztaraklarını bir ekranın önüne oturttu ve onlara bilgisayarda yapılmış, sürüklenen küçük parçacıklarla ilgili filmler izletti.[41] O kadar komik bir düzenekti ki kimse işe yarayacağını düşünmediği için deneyi ciddiye almadı. Ama işe yaradı: Parçacıklar yeterince büyükse ve yeterince yavaş hareket ediyorsa deniztarakları, beslenmeye hazırlanırcasına kabuğunu açıyordu. "Gördüğüm en akıl almaz şeydi," diyor Johnsen.

O zamanlar Speiser, deniztarağının besinin yerini tespit etmek için gözlerini kullanması gerektiğini düşünüyordu. Şimdiyse başka türlü düşünüyor. Deniztarağının sudaki molekülleri koklamak için kullandığı dokunaçlar gözlerinin arasına serpiştirilmiştir. Speiser'a göre bu hayvanlar, denizyıldızı gibi yırtıcıları tanımak için koku duyusunu kullanırken, ortalıkta koklayarak incelemeye değecek bir şey olup olmadığını saptamak için görme duyusundan faydalanır. Deney sırasında ekranın önünde kabuklarını açan deniztarakları o sırada beslenmeye değil, keşfetmeye çalışıyordu. "Tahminimce gördüğümüz şey, meraklı deniztaraklarıydı," diyor Speiser.

Speiser, deniztarağının görme duyusunun bizimkinden çok farklı çalıştığından şüpheleniyor. Beynimiz, iki gözümüzden gelerek örtüşen bilgiyi birleştirip tek bir görüntü oluşturur. Deniztarağı da aynı şeyi yüzlerce gözüyle *yapabilirdi* ama beyninin ne kadar basit olduğunu göz önüne alırsak bu pek mümkün görünmüyor. Onun yerine belki de her göz beyne hareket eden bir şey saptayıp saptamadığını bildiriyordur. Deniztarağının beynini, her biri hareket duyarlı bir kameraya bağlı yüz tane monitörü izleyen bir bekçi gibi düşünün. Kameralar bir şey saptarsa bekçi, arama köpeklerini gönderebilir. Sorun şu ki kameralar birer teknoloji harikası olsa da görüntüler *bekçiye gönderilmez*. Bekçi monitörde sadece, şüpheli bir

şey saptayan her kamera için bir uyarı ışığının yandığını görür. Speiser bu garip düzenleme konusunda haklıysa deniztarağının gözlerinden her birinin uzamsal çözünürlüğü iyi olduğu halde, hayvanın kendisi uzamsal *görüşe* sahip olmayabilir. Vücudunun belli bir bölgesindeki gözlerin ne zaman bir şey saptadığını bilir ama zihninde o nesnenin görsel bir imgesi oluşmaz. Kafasında, bizimkinde olduğu gibi bir film canlanmaz. Sahneler halinde görmez.

Bu tür bir görme, muhtemelen gözlerimizle tecrübe ettiğimiz şeyden çok, dokunma duyumuza daha yakındır. Cildimizin her noktasıyla hissedebilsek de kafamızda dünyanın dokunsal bir sahnesini oluşturmayız. Aslında bir şey bizi (ya da biz bir şeyi) dürtene kadar bu duyumsamaları büyük oranda görmezden geliriz. Beklenmedik bir şey hissettiğimizde en sık verdiğimiz tepki, dönüp o şeye bakmak olur. Belki de deniztarağının ayrıntılı ve derinlemesine araştırıcı duyusu görme değil koku, tüm bedeni saptamaya yönelik kaba duyusuysa dokunma değil görmedir.*

Madem öyle, niye gözlerden her birinin çözünürlüğü bu kadar iyi? Niye aynalar ve çift retina gibi karmaşık bileşenler var? Kabuğunun etrafındaki alanın bütününü taramak için birkaç göz yeterli olabilecekken deniztarağının niye bu kadar çok gözü var? Beyni, gözlerinden gelen bilgiyi zar zor idare eden bir hayvanda niye bu kadar iyi gözler evrildi?† Bu soruların yanıtlarını kimse bilmiyor. "Bazen deniztaraklarını neredeyse anlayabildiğimi ve onlarla gerçekten empati kurabildiğimi

---

* Bu fikir özellikle ilgi çekicidir çünkü gözler aslında değişikliğe uğramış kemosensör dokunaçlar, yani başlangıçta koku alma ve dokunma için kullanılmış eğreti bir görsel sistemdir.

† Mike Land 1964'te yüksek lisans öğrencisiyken bir deniztarağının gözünün içine bakıp kendi baş aşağı görüntüsünü görmüştü.[42] Gözlerden her birinde odaklayıcı bir ayna bulunduğunu böyle keşfetmişti. Daha sonra bu aynanın kristal tabakaları içerdiğini gösterdi ve kristallerin, DNA'nın yapıtaşlarından biri olan guaninden yapılmış olduğunu ileri sürdü (haklıydı). Guanin kristalleri doğada kare biçimini almaz, o nedenle deniztarağı bir şekilde kristallerin büyümesini kontrol ediyor olmalı.[43] Bunu nasıl yaptığını ya da her kristalin kalınlığının tam olarak aynı –bir metrenin 74 milyarda biri– olmasını nasıl sağladığını bilmiyoruz.

düşünüyorum," diyor Speiser. "Ama çoğu zaman yeniden kaybolduğumu hissediyorum."*

Bazı hayvanlar, gözleri olmadığı halde deniztarağındaki gibi dağıtılmış görme özelliğine sahiptir. Bir yılanyıldızı türü olan *Ophiomastix wendtii* incecik, dikenli bir denizyıldızına ya da belki bir buz hokeyi diskinden çıkan beş tane kıvrımlı kırkayağa benzer. Belirgin gözleri olmasa da açıkça görür. Işıktan kaçar, loş yarıklara doğru sürünür, hatta günbatımından sonra renk değiştirir. Lauren Sumner-Rooney 2018'de yılanyıldızının kıvrımlı kollarında boylu boyunca dizili binlerce fotoreseptör bulunduğunu gösterdi.[47] Hayvan âdeta bütünüyle bir petek göz gibi davranır.† Daha da tuhafı, sadece *gündüzleri* bir göz gibidir.[49]

Hava aydınlıkken, derisindeki pigment keseleri genişleyerek yılanyıldızına kan pıhtısı benzeri koyu kırmızı bir renk verir. Geceleri bu keseler küçülür ve hayvanın derisi soluk gri, çizgili bir görünüm alır. Pigment keseleri genişleyince, ışığın belli açılardan fotoreseptörlere ulaşmasını engeller. Bu da her reseptöre ikinci evre gözün yönsellik özelliğini ve hayvanın bütününe üçüncü evre gözün uzamsal görme özelliğini kazandırır. Fakat pigment keseleri gece küçülünce fotoreseptörler tamamen açıkta kalır. Gelen ışığın yönünü belirleyemedikleri için uzamsal görüş işlevsizleşir. "Işığa ne zaman maruz kaldığını bilir ama ondan nasıl kaçacağını bilemez," diyor Sumner-Rooney.

---

* Deniztarağı dağıtılmış görme özelliğiyle kafa karıştıran tek hayvan değil. Kitonlar, *Uzay Yolu*'ndaki Klingon'ların alınlarına benzeyen yumuşakçalardır.[44] Gövdelerini kaplayan zırhlı plakalarda yüzlerce küçük göz bulunur. *Sabellidae* ailesinden solucanlar, sert tüplerinden dışarı uzanan rengârenk toz alma püsküllerine benzer.[45] O renkli tüysü uzantılar, üzerlerinde çok sayıda göz bulunan dokunaçlardır. Dev istiridyeler gerçekten de çok büyüktür; bir metre çapındaki kabukları yüzlerce göz taşır.[46] Dan-Eric Nilsson bu gözleri hırsız alarmına benzetiyor. Civardaki hareketleri ve sınırları ihlal eden gölgeleri tespit eden bu gözlerin sahibi ne zaman tedbir alması gerektiğini bilir. Kitonlar kayalara yapışır, *Sabellidae* solucanları dokunaçlarını tüpün içine çeker, dev istiridyeler kabuklarını kapatır. Tıpkı deniztarakları gibi bu hayvanlar da muhtemelen sahneler halinde görmez.

† Görünüşe göre denizkestaneleri de tıpkı yılanyıldızları gibi tüm vücudunu kaba bir göz yuvarı olarak kullanıyor.[48] Denizkestanesi, yüzlerce tüp ayağın üzerinde sürünen dikenli bir toptur. Bu ayakların üzerinde bulunan fotoreseptörleri hayvanın dikenleri ya da sert dış iskeleti tarafından korunur. Görüşü çok keskin olmayabilir ama karaltılara doğru rahatlıkla ilerleyebilir.

Yılanyıldızının bu değişimden ne anlam çıkardığını kimse bilmiyor. Deniztarağından farklı olarak yılanyıldızının beyni bile yoktur; sadece merkezî diskin etrafını saran, merkezî özellik taşımayan bir sinir halkasına sahiptir. Halka, beş kolun eşgüdümlü çalışmasını sağlar ama onlara kumanda etmez; kollar çoğunlukla kendi başına hareket eder. Yılanyıldızı da sanki deniztarağıyla aynı garip kamera sistemine sahiptir ama onunkinde bekçi de yoktur. Kameralar âdeta birbirlerine sinyal verip durmaktadır. Bu, hayvanın bütün vücudunda böyle midir? Her kol kendi başına bir göz müdür? Her kol, birbirleriyle bağlantılı yarı özerk gözlerden mi oluşur? "Hiç aklımıza gelmeyen bir şey de olabilir," diyor Sumner-Rooney. "Hayvanların görme duyusuyla ilgili bugüne kadar bildiğimiz her şey, göz sahibi olmaya dayanıyor. Her şeyin temelini, birbirine yakın ve gruplanmış fotoreseptörlerle kesintisiz retinalar üzerine yapılmış yüzyıllık araştırmalara dayandırıyoruz. [Yılanyıldızı] bu kabullerin birçoğunu ihlal ediyor."

Çok sayıda gözü olan ama başı, bazen de beyni olmayan, yılanyıldızı ve deniztarağı gibi canlılar görmenin ne kadar tuhaf olabileceğini ortaya koyuyor. "Bir hayvanın, görme duyusunu kullanabilmesi için ille de bir resim görmesi gerekmez," diyor Sumner-Rooney. "Ama insanlar o kadar görsel yönelimli canlılar ki bize tamamen yabancı bu sistemleri kavramaya çalışmak çok zor." Başı ve iki gözü olan daha tanıdık canlıların görsel dünyalarını hayal etmek daha kolay. Gerçi o zaman bile burnumuzun dibindekini gözden kaçırabiliyoruz.

Sıcak hava sütunlarının üstünde yükselen kızıl akbabalar arazinin üzerinde süzülerek yiyecek arar. Yerdeki hayvan ölülerini fark edebildiklerine göre önlerindeki büyük engelleri de görebilmeleri gerekir. Fakat akbabalar, kartallar ve diğer büyük yırtıcılar sık sık rüzgâr türbinlerine çarparak ölür. Sadece İspanya'nın bir vilayetinde bile on yıllık süre içince 342 kızıl akbaba rüzgâr türbinlerine çarptı.[50] Gündüz uçan ve gezegendeki en keskin gözlere sahip canlılar arasında yer alan kuşlar nasıl olur da bu kadar büyük ve dikkat çekici yapılara çarpabilir? Kuşların görme duyusunu araştıran Graham Martin, bu soruyu bir başka soruyla yanıtladı: Akbabalar tam olarak nereye bakar?

Martin ve meslektaşları 2012'de kızıl akbabanın görme alanını (başını çevreleyen alanda gözlerinin kapsayabildiği kısım) ölçtüler.[51] Her

kuşun gagasını özel bir desteğin üzerine yerleştirip bir perimetreyle tüm yönlerden gözlerine baktılar. "Bir optisyenin göz testi yaparken kullandığı cihazın aynısı," demişti Martin o zaman. "Bütün mesele kuşu yarım saat boyunca oturtmak. Bir tanesi beni ısırmaya çalıştı ve başparmağımdan minik bir parça kopardı."

Perimetre, akbabanın görme alanının, başının iki yanındaki alanı kapsadığını ama aşağıda ve yukarıda büyük kör noktalar olduğunu ortaya çıkardı. Akbaba uçarken başını aşağı eğdiğinden kör noktası tam önüne düşer. İşte bu yüzden akbabalar rüzgâr türbinlerine çarpar. Havada süzülürken önlerine bakmazlar. Çünkü bugüne dek bakmaları gerekmemiştir. "Akbabalar uçuş rotaları üzerinde o denli yüksek ve büyük bir cisimle hiç karşılamamıştır," diyor Martin. Kuşlar yakındayken türbinleri kapatmak ya da birtakım yer işaretleriyle akbabaları oradan uzaklaştırmak işe yarayabilir. Ama türbinin bıçaklarına görsel işaretler koymanın faydası olmaz.* (Kuzey Amerika'da kel kartallar da aynı nedenle rüzgâr türbinlerine çarpar.)

Martin'in çalışmasını düşünürken birdenbire, göremediğim ve üzerinde pek düşünmediğim, başımın arkasındaki o büyük alanın farkına varıyorum. İnsanların ve diğer primatların dosdoğru öne bakan iki göze sahip olması oldukça tuhaf. Sol göz sağdakiyle çok benzer bir manzara görür ve iki gözün görme alanları büyük ölçüde örtüşür. Bu düzenleme bize mükemmel bir derinlik algısı kazandırır. Bu aynı zamanda, her iki yanımızı zar zor görebilmemiz ve arkamızı başımızı çevirmeden görememiz anlamına gelir. Bizim için görme, yüz çevirmeyle eş anlamlıdır; keşfetmek için dönüp bakarız. Ama kuşların çoğu (baykuşlar hariç) iki yana bakan gözlere sahiptir ve bir şeye bakmak için kafalarını o yöne çevirmeleri gerekmez.

Gökyüzünde süzülürken gözleriyle yeri tarayan bir akbaba, yanında uçan diğer akbabaları sağa sola dönmeden görebilir.[52] Bir balıkçılın

* Akbabanın neden uçarken öne bakmasını sağlayacak daha geniş bir görme alanı yok? Martin bunun, akbabaların büyük ve keskin gözlerinin, güneşin göz kamaştırıcı parlaklığı karşısında savunmasız olmasından kaynaklandığını düşünüyor. İri gözlü kuşların kör noktalarının da genellikle daha büyük olduğunu söylüyor. Ördekler gibi panoramik gören kuşların gözleri, güneş ışığına daha iyi tahammül edebilmek için genellikle daha küçük ve daha az keskindir.

görme alanı düşey düzlemde 180 derecedir ve gagası dimdik öne uzanmış, ayakta dururken bile ayağının dibinde yüzen balıkları görebilir. Yeşilbaş ördeğin görme alanı tamamen panoramiktir; ne yukarıda ne de arkasında kör nokta vardır. Yeşilbaş ördek, gölün üstünde hiç hareket etmeden bütün gökyüzünü görebilir. Uçarken ise dünyayı aynı anda hem kendisine yaklaşıyormuş hem uzaklaşıyormuş gibi görür. "Kuş bakışı" ifadesini bir manzaranın yüksekten görünüşü anlamında kullanırız. Oysa bir kuşun bakışı, aslında insanın yukarından bakışı gibi değildir. "İnsanın görsel dünyası öndedir ve insanlar ona doğru ilerler," diye yazmıştı Martin. Ama "kuşların dünyası etraflarındadır ve kuşlar onun içinden geçer."[53]*

Kuşlarda gözün en keskin gördüğü bölge de insandakinden farklıdır. Birçok hayvanın retinasında, fotoreseptörlerin (ve refakatçi nöronların) yoğun olduğu, görme çözünürlüğünü artıran bir alan bulunur.[54] Farklı canlılarda bu bölgeye farklı isimler verilir. Omurgasızlardakine *keskin görüş bölgesi* [*acute zone*], omurgalılardakineyse *merkezî alan* [*area centralis*] denir. Bu alan bizdeki gibi içeri doğru çökükse *fovea* olarak adlandırılır. Görme duyusu üzerine çalışan biliminsanları hariç –onlar da kusuruma bakmasın– hepimizin işini kolaylaştırmak adına *keskin görüş bölgesi* terimine sadık kalacağım. İnsanlarda bu bölge, görme alanının ortasında, hedef tahtası gibi yuvarlak bir noktadır. Bu harfleri okurken ona doğru nişan alıyorsunuz. Kuşların da çoğunda keskin görüş bölgesi daireseldir ama öne değil, dışarıya dönüktür. Detaylı incelemek istedikleri nesnelere her seferinde tek gözle yandan bakmaları gerekir. Bir tavuk yeni bir şeyi araştırırken, başını iki yana sallayarak, gözlerden önce birinin, sonra da diğerinin keskin görüş bölgesiyle bakar.[55] "Tavuklar size baktığı sırada diğer gözün ne yaptığını bilemezsiniz," diyor, kuşlarda görme duyusunu araştıran zoolog Almut Kelber. "Dikkatlerini odakladıkları en az iki nokta olmalı ki bunu hayal etmek çok zor."

Kartallar, doğanlar ve akbabalar gibi yırtıcı kuşların *her bir gözünde* iki keskin görüş bölgesi bulunur; bunlardan biri ileri, diğeriyse 45

* Tavuklar ve diğer birçok kuş sadece yakın menzilde gagaları ya da ayaklarıyla bir şey yakalamak istedikleri zaman cepheden (frontal) görüşe güvenir.

derecelik açıyla dışa bakar.[56] Yana bakan bölgenin görüşü daha keskindir ve çoğu yırtıcı kuş avlanırken onu kullanır. Gökdoğan, bir güvercine doğru dalışa geçerken dümdüz avının üstüne alçalmak yerine sarmal çizerek iner.[57] Bir yandan başı aşağıda aerodinamik konumunu korurken bir yandan da güvercini göz hapsinde tutmasının tek yolu budur.*

Gökdoğan, avını sağ gözüyle izlemeyi tercih eder. Bu gibi tercihler kuşlarda yaygındır; farklı manzaralar gören iki gözü farklı işler için kullanabilirsiniz. Tavuk beyninin sol yarısı, dikkatin odaklanması ve nesnelerin sınıflanması konusunda özelleşmiştir.[58] Kuş sağ gözünü (beynin sol yarısı tarafından kontrol edilir) kullandığında çakıl taşları arasında fark edebildiği yemi, sol gözünü kullanırsa fark edemez. Beynin sağ yarısı beklenmedik durumlarla ilgilenir; birçok kuş sol gözünü (beynin sağ yarısı tarafından kontrol edilir) yırtıcıları taramak için kullanır ve soldan yaklaşan bir tehlikeyi daha çabuk saptar.

Bir hayvanın görme alanı, nereyi görebildiğini belirler. Keskin görme bölgeleriyse nereyi *iyi* gördüğünü belirler. Her iki özelliği birlikte ele almazsak hayvanın eylemlerini çok yanlış yorumlayabiliriz. TikTok'ta viral olan bir video, erkek bir argus sülününü, göz kamaştırıcı tüylerini kabartarak dişiye kur yaparken gösterir. Videoyu izleyenler, yana bakan görüş alanıyla doğrudan erkeğe baktığını bilmediklerinden dişinin ilgisiz görünmesine güler. Bir fokun görme alanı bizimkine daha çok benzer ama başının üstünü mükemmel biçimde kapsarken aşağıyı yeterince kapsamaz; bu da muhtemelen yukarıda yüzen balıkların siluetini fark edebilmesini sağlar.[59] Sırtüstü yüzen bir fok bize dinleniyormuş gibi görünse de aslında o sırada yiyecek bulmak için deniz tabanını tarıyordur.

İnekler ve diğer çiftlik hayvanları, bakışları çok sabit olduğundan uykulu görünür.[60] Bir insanın (ya da sıçrayan örümceğin) tersine bu hayvanlar nadiren birine dönüp bakar. Dönmeleri gerekmez zaten. Görme alanı başı neredeyse çepeçevre sarar ve yatay şeritler halindeki keskin görme bölgeleri bütün ufku aynı anda görebilmelerini sağlar. Aynı durum, düz habitatlarda yaşayan tavşanlar (kırlar), kemancı yengeçler (deniz kıyısı), kırmızı kangurular (çöller) ve suda koşanlar (göl

* Gözleri çevirmek söz konusu bile olamaz çünkü alıcı kuşlar başlarını çevirmeden gözlerini pek hareket ettiremezler. Aslında gözleri o kadar büyüktür ki kafatasının içinde neredeyse birbirine değer.

yüzeyi) gibi diğer hayvanlar için de geçerlidir.[61] Ara sıra havada beliren yırtıcılar dışında *yukarısı* ve *aşağısı* onlar için çoğunlukla önemsizdir. Her yönde göz alabildiğine *uzanan* bir alan vardır sadece. Bir inek aynı anda hem önden yaklaşan çiftçiyi hem arkadan gelen çoban köpeğini hem de sürüdeki arkadaşlarını görebilir. Görme deneyimimizin ayrılmaz bir parçası olan *etrafa bakma*, aslında hayvanların yalnızca sınırlı görme alanlarına ve dar keskin görme bölgelerine sahip olduğunda başvurdukları alışılmadık bir faaliyettir.

Filler, su aygırları, gergedanlar, balinalar ve yunusların gözlerinde, muhtemelen başlarını çabuk çeviremedikleri için ikişer ya da üçer keskin görme bölgesi bulunur.[62*] Bukalemunların başını çevirmesi gerekmez çünkü taret benzeri gözleri birbirinden bağımsız hareket edebilir; bu hayvanlar aynı anda hem öne hem arkaya bakabilir, zıt yönlere hareket eden iki hedefi eşzamanlı izleyebilir.[64] Diğer hayvanların bakışları daha sabittir. Erkek sineklerin çoğu yukarı odaklanır.[65] Petek gözlerin tepesindeki "aşk noktaları" denen geniş fasetleri, yukarıda uçan dişilerin siluetini saptamaya yarar. Erkek mayıssinekleri işi daha da ileri götürür: Dişileri fark eden bölümler öylesine muazzamdır ki gözleri birer aşçı şapkası takmış gibi görünür. Güney Amerika nehirlerinin yüzeyinde yaşayan *Anableps anableps* balığı *da* gözlerini bölümleyerek kullanır.[66] Gözün suyun dışında kalan üst yarısı havada görmeye, altında kalan yarısıysa suda görmeye uyum sağlamıştır. Bu yüzden dört gözlü balık olarak bilinir.

Derin okyanusların üç boyutlu dünyasında yukarısı ve aşağısı da ön ve arka kadar önemlidir. Fıçı gözlüler ve balta balıkları gibi derin deniz balıklarının yukarıya dönük tüp şeklindeki gözleri, aşağıya inen zayıf güneş ışığında diğer hayvanların hatlarını siluet halinde seçmelerini sağlar. Fıçı gözlülerin bir türü olan kahverengi burunlu hayalet balığında, akrabasındaki yukarı dönük göze, kendine ait retinası olan aşağı dönük bir odacık eklenmiştir.[67] İki bölümlü gözleri sayesinde balık aynı anda hem yukarı hem de aşağı bakabilir. Sol gözü sağdakinin iki katı büyüklüğünde

---

* Balinanın gözbebeği bizimki gibi daralarak küçülmez. Ortasından sıkışır ve iki ucunda küçük birer açıklığın olduğu, gülümseyen garip bir ağız gibi görünür. Bu küçük açıklıklar aslında birer mini-gözbebeğidir ve her biri ışığı ayrı bir netlik bölgesine yönlendirir.[63]

olan horoz gözlü kalamar da aynısını yapabilir.[68] Su sütununun içinde asılı vaziyette aşağıya dönük küçük gözüyle biyolüminesan parıltıları yakalarken, yukarı dönük büyük gözüyle siluetleri görür. Bir derin deniz kabuklusu olan *Streetsia challengeri*'deyse gözler kaynaşarak tek bir yatay silindir oluşturur.[69] Bu hayvan çepeçevre her yönü –yukarıyı, aşağıyı ve yanları– görebilir ama önünü ve arkasını göremez.

Bir *Streetsia* ya da bir bukalemun, hatta bir inek gibi görmenin nasıl bir şey olduğunu hayal etmek neredeyse imkânsızdır. Akıllı telefonumun arka kamerası arkamda ne olduğunu gösterebilir ama o görüntü yine de benim ısrarla ileri bakan görme alanımda belirir. Dokunmayı düşünmenin, deniztarağında olduğu gibi bu durumda da faydası olur. Başımda, ayak tabanlarımda, göğsümde ve sırtımdaki dokunuşları aynı anda hissedebilirim. Konsantre olursam bu duyumsamanın çok yönlü doğasını, görme duyusunun uzun menziliyle kaynaştırmanın nasıl bir şey olabileceğini neredeyse hayal edebiliyorum. Görme, olası yönlerden herhangi birine ya da hepsine birden uzanabilir. Çepeçevre sarıp kuşatabilir. Zamana ve mekâna göre değişebilir. Sadece etrafımızdaki mekânsal boşlukları değil, anlar arasındaki geçici boşlukları da doldurabilir.

Akdeniz'de *Coenosia attenuata* adlı kendi halinde, küçük bir sinek yaşar. Soluk gri bedeni ve iri kırmızı gözleriyle, birkaç milimetre uzunluğundaki bu sinek, "standart bir ev sineği gibi görünür," diyor Paloma Gonzalez-Bellido. Ama aslında bir katildir. Tünediği yapraktan kalkıp meyve sineklerinin, mantar sivrisineklerinin, beyaz sineklerin, hatta diğer katil sineklerin, Gonzalez-Bellido'nun söylediğine göre "boyun eğdirebileceği kadar küçük her şeyin" peşine düşer. Kovalamaca sırasında bacaklarını uzatır ve bunlardan biri hedefe dokunur dokunmaz altı bacağını da kapatıp bir kafes oluşturur. Kurbanını genellikle uçmadan önce tünediği yere götürür. Bir katil sineği parmağınızın üzerine çıkmaya ikna edebilirseniz terbiyecisine geri dönen (minicik) bir doğan gibi o da tekrar tekrar parmağınızdan havalanacak ve avıyla geri dönecektir.[70] Bu, bir insan için beklenmedik, büyülü bir deneyim olabilir. Avın kendisi içinse öyle olduğu söylenemez. Tipik bir ev sineğinin hortumu, dokunmak ve sıvıları emmek için kullandığı ucu süngerli bir

sopaya benzer; bir katil sineğin hortumuysa saplamak ve kazımak için kullandığı, hançerle törpü karışımı bir alete benzer. Sinek hortumunu kurbanının vücuduna sokuşturup canlı canlı içini boşaltır. Gonzalez-Bellido'nun çektiği bir videoda, bir katil sineğin ağız parçalarıyla bir meyve sineğinin gözünü içeriden kazıyarak nasıl yediğini ve geride saydam mercekler dışında bir şey bırakmadığını görebilirsiniz. Çiftçiler ve bahçıvanların bitki zararlılarının icabına bakmak için seralarda kullandıkları bu böcek günümüzde bütün dünyaya yayılmıştır.

Katil sinekler için hız her şeydir. "Avları her yerden çıkabilir ve Akdeniz o kadar kuraktır ki nadiren av bulabilirler," diyor Gonzalez-Bellido. Makul bir öğün olabilecek her şey için derhal harekete geçerler ve havalandıktan sonra, kendi türlerinin yamyamlığına kurban gitmemek için avlarını olabildiğince çabuk yakalarlar. Bu kovalamacayı ehil gözlerin bile takip etmesi neredeyse imkânsızdır. Gonzalez-Bellido yüksek hızlı kameralarla filme çektiği kovalamacanın genellikle çeyrek saniye sürdüğünü gösterdi.[71] Hatta her şey bunun yarısı kadar sürede olup bitebilir. Bir katil sinek hedefini göz açıp kapayıncaya dek yakalayabilir.

Bu sinekler aşırı hızlı görme sayesinde aşırı hızlı avlanabilir.[72] Hayvanlarda görme hızlarının farklı olduğunu söylememiz tuhaf gelebilir; ne de olsa evrendeki en hızlı şey ışıktır ve görme bizim için anlık bir olaydır. Fakat gözler ışık hızında çalışmaz. Fotoreseptörlerin göze gelen fotonlara tepki vermesi ve oluşturdukları elektriksel sinyallerin beyne ulaşması zaman alır. Evrim, katil sineklerde bu adımların sınırlarını zorlamıştır. Gonzalez-Bellido, bu sineklere bir resim gösterdiğinde, fotoreseptörlerin elektrik sinyalleri göndermesi, bu sinyallerin beyne ulaşması *ve* beyinlerinin kaslarına komut vermesinin 6-9 milisaniye sürdüğünü ortaya çıkarmıştır.* Oysa insan fotoreseptörlerinin, bu adımların sadece ilkini gerçekleştirmesi bile 30-60 milisaniye alır.[74] Bir katil sinekle aynı anda bir resme bakarsanız sinyal daha sizin retinanızdan ayrılmadan sinek havalanmış olacaktır. Gonzalez-Bellido neredeyse gurur dolu bir

* Katil sineğin gözündeki fotoreseptörler çabuk ateşlenir ve hızla eski haline döner. Her iki özellik de çok fazla enerji gerektirir. Bir meyve sineğininkilere kıyasla katil sineğin fotoreseptörleri üç kat fazla mitokondri (hayvan hücrelerinin güç kaynağı olan organeller) içerir.[73]

ifadeyle, "Bu sineğinkinden daha hızlı fotoreseptörler bilmiyoruz," diyor.*

Sinek, görüşünü de daha hızlı günceller. Kırpışan bir ışığa baktığınızı düşünün. Kırpışma hızlandıkça, bir noktadan sonra parlama anları birleşip sabit bir ışık gibi görünür. Buna kritik titreşim kaynaşma frekansı (*critical flicker-fusion frequency*, CFF) denir. Bu değer, beynin görsel enformasyonu ne kadar çabuk işleyebildiğinin bir ölçüsüdür. Bunu bir hayvanın kafasında oynayan filmin resim karesi hızı –statik görüntülerin birleşerek sürekli bir devinim yanılsaması yarattığı nokta– olarak düşünün. İnsanlarda iyi bir ışıkta CFF saniyede 60 kare (ya da 60 hertz, Hz) civarındadır. Sineklerin çoğunda bu değer 350'ye kadar çıkar. Katil sineklerde muhtemelen daha da yüksektir. İnsanların izlediği bir film, katil sineğe bir slayt gösterisi gibi görünür. En hızlı hareketimiz bile ona yavaş görünür. Kendisini öldürme niyetiyle kalkan elden kolayca kaçıverir. Boks, bir katil sineğe tai chi gibi görünür.

Genellikle daha küçük ve hızlı hayvanların CFF'si daha yüksektir.[75] İnsanla kıyaslandığında kedilerin görmesi biraz daha yavaş (48 Hz), köpeklerinki biraz daha hızlıdır (75 Hz). Deniztarağının gözleri kesinlikle çok yavaş (1-5 Hz), gececil kara kurbağalarınınki daha da yavaştır (0,25-0,5 Hz). Deri sırtlı deniz kaplumbağasının (15 Hz) ve Gröndland fokunun (23 Hz) gözleri biraz daha hızlı olsa bile yine de ağır kalır.[76] Kılıçbalığınınkiler de normal koşullarda daha iyi değildir (5 Hz) ama bu balıklar özel bir kas yardımıyla gözlerini ve beyinlerini ısıtıp görme hızını sekiz kat artırabilir.[77] Birçok kuş doğal olarak hızlı görür. Küçük bir ötücü kuş olan kara sinekkapan, belki de hayatta kalmak için uçan böcekleri izlemek ve yakalamak zorunda olduğundan, 146 Hz'lik

* Yusufçuklar ve avcı sinekler gibi diğer yırtıcıların, ayırt edici netlik bölgelerine sahip, yüksek çözünürlüklü, büyük gözleri vardır. Hedeflerini takip ederken başlarını çevirerek avı, görme alanlarının en keskin yerinde tutarlar. Katil sinekler, "tüm yönlere dikkat etmek zorundadır," diyor Gonzalez-Bellido çünkü bu böceklerde netlik bölgesi bulunmaz ve görme çözünürlüğü fazla yüksek değildir. Buna rağmen, avlanma stratejileri daha zahmetli görünür. Yusufçuklar gökyüzüne karşı avlanır, üzerlerinde uçan avın siluetini fark eder. Ama katil sinekler, "zemine karşı avlanarak imkânsızı başarırlar," diyor Gonzalez-Bellido. Karmaşık arkaplanlarda hareket eden avlarını ayırt edip hedeflerini yaprakların arasında ve diğer kalabalık ortamlarda kovalarlar.

CFF'siyle bilinen en yüksek görme hızına sahip omurgalıdır.[78*] Yakaladığı böceklerin gözleri daha da hızlıdır. Balarılarının, yusufçukların ve sineklerin CFF'leri 200-350 Hz'tir.[80]

Bu görme hızlarının her birinde, zaman akışının farklı algılanıyor olması mümkün. Deri sırtlı deniz kaplumbağasının gözüne dünya zaman aralıklı çekimde hareket ediyormuş ve insanlar bir sineğin çılgın temposuyla koşturuyormuş gibi görünebilir. Bir sineğin gözündense dünya yavaş çekimde hareket ediyormuş gibi görünebilir. Diğer sineklerin algılanamayacak kadar hızlı hareketleri, algılanabilir aheste hareketlere dönüşürken, yavaş hayvanlar hiç hareket etmiyormuş gibi görünebilir. "Herkes katil sinekleri nasıl yakaladığımızı soruyor," diyor Gonzalez-Bellido. "Elinizde küçük bir şişeyle yavaşça ilerleyin. Yeterince yavaş hareket ederseniz, arkaplanın bir parçası haline gelirsiniz."

Hızlı görme çok ışık gerektirir. O nedenle katil sinekler sadece gündüzleri aktiftir. Diğer hayvanlarsa bu kadar kısıtlı değildir.

Güneşin altın sarısı ışıkları Panama'daki yağmur ormanlarından çekilir, gölgeler daha da koyu karanlığa gömülürken, küçük bir arı içi boş bir daldan dışarı çıkar. Bu, *Megalopta genalis* ya da diğer adıyla ter arısıdır. Bacakları ve karnı altın sarısı, başı ve gövdesi metalik yeşildir. İnsanlar bu güzel tonların hiçbirini göremez çünkü arı, insanların, değil renkleri, etrafı bile göremeyeceği kadar az ışık varken ortaya çıkar. Fakat *Megalopta* karanlığa rağmen tropikal sarmaşıklar labirentinde slalom yaparak en sevdiği çiçeklerin izini sürer. Yeterince polen topladıktan sonra yuvalandığı, başparmak kalınlığındaki dala geri döner.

Çocukluğunu böcek toplayarak geçirdikten sonra şimdi de böcek gözlerini inceleyen Eric Warrant, *Megalopta*'yla 1999'da, Panama'ya yaptığı bir araştırma gezisinde karşılaşmıştı. Bu arının gece uçuşlarında görme duyusunu kullandığını büyük bir şaşkınlıkla doğruladı. Kızılötesi kameralarla çektiği filmlerde, arının dalın içinden çıktıktan sonra dönüp girişin önünde yavaşça süzüldüğünü ve etraftaki yeşilliğin

* Geleneksel floresan ışığın kırpışma frekansı 100 Hz'dir, yani saniyede 100 kez kırpışır.[79] Bu kırpışma insanların göremeyeceği kadar hızlıdır ama sığırcıklar ve diğer birçok kuş için öyle olmadığından floresan ışık onlar açısından stresli ve rahatsız edici olsa gerek.

görünümünü ezberlediğini gördü.[81] *Megalopta* yiyecek aramayı bitirdiğinde eve dönüş yolunu bulmak için bu görsel hafızayı kullanır. Warrant, beyaz kareler gibi yer işaretleri kullanıp arı yokken bunları başka bir dala taşıdığındaysa hayvan yanlış adrese dönüyordu. Arının işi parlak gün ışığında bile yeterince zordu, zira yağmur ormanlarında yön bulmak kolay olmadığı gibi, etraf da dallardan geçilmez. Ama Warrant'ın söylediğine göre *Megalopta* her nasılsa "hayal edebileceğiniz en loş ışıkta" dahi eve dönüş yolunu bulur. Arıyı yuvasını bulurken filme çektiği gecelerde etraf öylesine karanlıktı ki Warrant burnunun ucunu göremiyordu. Arının gördüklerini görebilmesi için gece görüş gözlüğü kullanması gerekiyordu. "Bir bal arısı parlak gün ışığında ne kadar beceriksizse bu arılar da karanlıkta ancak o kadar beceriksizdir," diyor Warrant. "Hızla uçup gelir, hiç tereddüt etmeden olağanüstü hızlı iniş yaparlar. Bugüne dek gördüğüm en muhteşem şeylerden biri."

Warrant, *Megalopta*'nın atalarının, başka arılar ve gündüz beslenen diğer tozlaştırıcılarla yoğun rekabetten kaçmak için gececil bir programa dümen kırdığından şüpheleniyor. Ancak gece hayatı, görme duyusuna güvenen hayvanlar için iki önemli nedenden ötürü kolay değildir. Birincisi ortada: Çok daha az ışık olduğu için. Dolunayda bile ışık, gün ışığının milyonda biri kadardır. Sadece yıldızların gözüktüğü, mehtapsız bir gecedeyse bunun yüzde birine düşer. Bulutlar ya da ağaç tepeleri yıldızları örtüyorsa onun da yüzde birine iner. *Megalopta* bir gözün zar zor toplayabileceği kadar az ışığın olduğu yıldızsız, karanlık bir gecede bile yönünü bulabilir.[82] İkinci nedeni sezmek biraz daha zor: Fotoreseptörler yanlışlıkla kendiliğinden harekete geçebilir ve geceleri bu yanlış alarmların sayısı, gerçek fotonlardan gelen gerçek sinyallerin sayısını kolayca aşabilir. O nedenle gececil hayvanlar, ortamdaki azıcık ışığı saptayabilmenin yanı sıra, gerçekte var olmayan hayalet ışıkları da görmezden gelmek zorundadır. Hem fiziğin sınırlarını hem de biyolojinin karmaşasını aşmaları gerekir.[83]

Bazı hayvanlarsa mücadeleden çekilmiştir. Bütün duyu sistemleri gibi gözlerin de inşası ve idamesi pahalıya patlar. Fotoreseptörleri ve ilişkili nöronları, gerektiğinde tepki verebilmeleri için ışığın gelişine hazırlamak dahi fazlasıyla enerji harcatır.[84] Yani görme olasılığı, hayvan hiçbir şey görmezken dahi kaynaklarını boşaltır. Bu enerji harcaması

o kadar önemlidir ki gözler işe yaramaz ya da etkisiz hale geldiğinde küçülmeye ya da kaybolmaya meyleder. Bazen hayvanlar, ışığın boyunduruğu altında olmayan diğer duyulara yatırım yapar. (Onlarla daha sonra tanışacağız; birçok istisnai duyu, hayvanların zifiri karanlıkta yaptığı inanılmaz şeylerin fark edilmesi sonucunda keşfedilmiştir.) Bazıları görme duyusundan tamamen vazgeçer.[85] Yeraltı âlemlerinde, mağaralarda ve görmenin hak ettiği değeri bulmadığı diğer karanlık köşelerde gözler çoğu zaman kaybolur.*

Diğer hayvanlar görme yetilerini karanlığa teslim etmek yerine, ışığın en az olduğu koşullarda görmenin bazı yollarını geliştirmiştir. Warrant'ın araştırdığı ter arıları gibi bazı hayvanlar nöral hilelere başvurur.[87] Ter arısı, farklı fotoreseptörlerden gelen yanıtları bir araya getirip çok sayıda küçük pikseli birkaç büyük megapiksele dönüştürür. Ayrıca bu hayvanın fotoreseptörleri, daha uzun pozlama için deklanşöre basılı tuttuğunuz bir fotoğraf makinesi gibi, ateşleme öncesinde daha uzun süre foton toplar. Bu iki strateji, arının gözüne ulaşan fotonları uzayda ve zamanda gruplayarak sinyal/gürültü oranını artırır. Sonuçta arının görüşü grenli ve yavaştır ama parlaklığın imkânsız göründüğü zamanlarda parlak kalır. Ayrıca Warrant'ın söylediği gibi, "daha kaba, daha yavaş ve daha parlak bir dünya, hiçbir şey görmemekten iyidir."†

Bazı hayvanlar karanlıkta görebilmek için mümkün her fotonu yakalar. Kedilerde, geyiklerde ve diğer birçok memelide, retinanın arkasında tapetum denen bir katman bulunur; bu katman, fotoreseptörleri aşan ışığı yansıtarak geri gönderir. Böylece fotoreseptörler, ilk geçişte kaçırdıkları

---

* Bir gözün ortadan kalkmasının birçok yolu var ve evrim bu yolların hepsini keşfetti.[86] Mercekler dejenere oldu, görme pigmentleri kayboldu. Göz yuvarları derinin altına indi ya da üzerleri deriyle örtüldü. Sadece Meksika mağara balığı bile farklı gören popülasyonların aydınlık nehirlerden karanlık mağaralara taşınmasıyla gözlerini birkaç kez kaybetti ve birbirinden bağımsız olarak birkaç kez görme duyusundan vazgeçti. Eric Warrant'ın da dediği gibi "*Hobbit*'te Gollum'un gözlerinin aşırı büyük olması bilimsel açıdan anlamsızdır."

† Ancak bu, *Megalopta genalis*'in gece görmesini tam olarak açıklamıyor. "Nasıl yaptıklarını açıklayamıyorum," diyor Warrant. "Loş ışıkta görüşü güçlendirmek için kullandıkları mekanizmalardan bazılarıyla ilgili ipuçları var ama resmin bütününü göremiyorum."

fotonları toplamak için ikinci bir şans yakalar.* Bazı hayvanlarda olağanüstü iri gözler ve geniş gözbebekleri gelişmiştir. Alaca baykuşun gözleri öyle büyüktür ki kafasından dışarı doğru uzanır. Güneydoğu Asya'da yaşayan, gremlin benzeri küçük primatlar olan tarsiyerlerin gözleri beyinlerinden daha büyüktür.[89] En büyük gözlerse gezegenin en karanlık ortamlarından birinde, derin okyanuslarda evrilmiştir.

Okyanusa dalmak, gezegenin en büyük habitatına girmek demektir ve burada, yüzeydeki bütün ekosistemlerin toplamından 160 kat daha fazla yaşam alanı bulunur.[90] Bu alanın büyük bölümü karanlıktır.

On metre derinlikte yüzeydeki ışığın yüzde 70'i soğurulur. Bir batiskafla aşağı iniyor olsaydınız üzerinizdeki kırmızı, turuncu ya da sarı olan her şey bu derinlikte siyah, kahverengi ya da gri görünürdü. Elli metre derinlikte yeşil ve morlar da kaybolur. Yüz metre derinlikte geriye sadece, yoğunluğu yüzeydekinin belki yüzde 1'i kadar olan mavi kalır. Mavinin yoğunluğu, alacakaranlık bölgesi de denen mezopelajik zonun başladığı 200 metrede, 50'de bir oranında azalır. Bu noktada mavi, lazer benzeri, saf ve her şeyi kapsayan, tüyler ürpertici bir görünüm alır. Gümüşi balıklar sağa sola koşuşur. Denizanaları ve sifonoforlar kıvrılarak süzülür. Üç yüz metre derinlikte ortam mehtaplı bir gece kadar karanlıktır ve derinlikle birlikte karanlık da artar. Balıklar giderek daha siyah, omurgasızlarsa daha kırmızı görünmeye başlar. Derine indikçe kendi ışığını üreten canlıların sayısı artar ve biyolüminesan ışıltılar aracınızın hatlarını aydınlatır. Sekiz yüz elli metreye indiğinizde güneş ışığı o kadar soluktur ki gözleriniz bir işe yaramaz. Bin metre hiçbir hayvanın göremeyeceği kadar karanlıktır. Buradan itibaren batipelajik zon denen gece yarısı kuşağı başlar. Yüzeydeki karmaşık görsel manzaralar bu derinlikte yerini zifiri karanlığın içinde yanıp sönen biyolüminesansın canlı yıldız tarlasına bırakır. Dünya üzerinde nerede bulunduğunuza göre, daha 10 bin metre kadar inecek yolunuz olabilir.[91]

* Köpek, kedi, geyik ve diğer bazı hayvanların gözleri, tapetumdaki yansımalardan ötürü araba farları ya da fotoğraf makinesinin flaşı karşısında parlar. Rengeyiğinin tapetum yapısı, karanlık kış günlerinde daha fazla ışık yansıtabilmek için değişir. Bu, tesadüfen tapetumun rengini de değiştirir ve ren geyiğinin yazın altın sarısı gözleri kışın maviye döner.[88]

Bu mutlak karanlık, derin okyanus sakinlerini araştırmak isteyen biliminsanlarına sorun çıkarır. Araştırmacılar batiskafın ışıklarını yakmadıkları takdirde etrafı göremezler ama ışıkları yakmak da buradaki ışıksız yaşama uyum sağlamış canlıları mahveder. Ay ışığı bile derin deniz karidesini birkaç saniyede kör edebilir. Batiskafın ışıkları çok daha kötüsünü yapar. Bazı derin deniz hayvanları, denizaltı araçlarına kamikazeler gibi saldırır. Şaşkına dönen kılıçbalıkları bu araçlara kılıç darbeleri indirir. Bazı canlılarsa donakalır ya da kaçar. "Okyanus araştırmalarında, kaçma ihtimali olan her şeyi uzak tutan, yüz metre çapında bir küre yarattığımızı düşünürüz," diyor Sönke Johnsen. "Çoğu zaman korku ve körlükle karşılaşıyoruz. Işıldayan bir tanrı tarafından öldürüldüğünü düşünen hayvanların nasıl davrandığını görüyoruz."

Johnsen'in hocası Edith Widder, derin deniz Umwelt'lerine daha saygılı olmak için Medusa adlı bir gizli kamera geliştirdi.[92] Bu kamera, biyolüminesan denizanalarını andıran mavi LED'lerden yapılmış bir halkayla kendine çektiği derin deniz hayvanlarını, çoğunun göremediği kırmızı ışık altında görüntülüyor. "Tek gerçek yenilik, ışıkları söndürmemiz oldu," diyor Johnsen. "Bunu yapınca gerçekten muhteşem şeyler ortaya çıkıyor."

Widder ve Johnsen 2019 Haziran'ında, Meksika Körfezi'nde on beş günlük bir araştırma gezisine çıktılar. Görünüşe göre Körfez'deki tek fırtınanın ortasında, 136 kiloluk kamerayı 2 bin metrelik hattın sonuna kadar elle indirip ertesi gece tekrar yukarı çekiyorlardı. "Buzdolabı büyüklüğünde bir şeyi 1,5 kilometre yukarı çekmeyi denediniz mi?" diye soruyor Johnsen. "Her gece üç saatimizi alıyordu." Nathan Robinson her seferinde Medusa'nın çektiği filmleri dikkatle inceliyordu. Kamerayı dört kez kullandıktan sonra, "azıcık biyolüminesan bir karides gördük," diyor Johnsen. "Yaşasın?"

Derken 19 Haziran'da: "Ben köprüdeydim ve Edie birdenbire merdivenlerin dibinde belirdi, ağzı kulaklarına varıyordu. Şöyle düşündüm: Bunun tek anlamı olabilir." Beşinci denemede Medusa bir dev kalamarın filmini çekmişti.

Görüntüler şüpheye yer bırakmıyordu.[93] Yedi yüz elli dokuz metre derinlikte uzun bir silindir beliriyor, yılan gibi kıvrıla kıvrıla kameraya doğru ilerliyor, sonra da kıvranan vantuzlu kollardan oluşmuş bir

kütleye dönüşüyordu. Ekip bunun, üç metre uzunluğunda genç bir dev kalamar olduğunu tahmin etti. Türün 13 metreyi bulan azami boyutunun yakınından dahi geçmese bile yine de *dev kalamardı*; yani gezegendeki en büyük ve en hassas gözlere sahip efsanevi hayvandı.

Bu bölümün başında da söylediğim gibi dev kalamarın (ve onun kadar uzun ama ondan çok daha ağır olan colossal kalamarın)* çapı 27 santimetreyi bulan gözleri futbol topu boyutlarına ulaşabilir. Bu oranlar şaşırtıcıdır. Evet, büyük gözler daha hassastır ve karanlık okyanustaki bir hayvanın gözlerinin büyük olması mantıklıdır ama derin denizlerde yaşayanlar dahil hiçbir canlının gözleri dev kalamarın ya da colossal kalamarın gözleriyle aşık atamaz.[94] İkinci sırada gelen mavi balinanın gözleri bunun yarısı kadardır. En büyük gözlü balık olan kılıçbalığının 9 santimetre çapındaki gözleri, dev kalamarın gözbebeği kadardır. Kalamarın gözleri yalnızca büyük değil, başka herhangi bir hayvanın gözleriyle kıyaslandığında abes kaçacak kadar büyüktür. Dev kalamar, kılıçbalığınınki kadar büyük gözlerle neyi göremez de daha büyük gözlere ihtiyaç duyar?

Sönke Johnsen, Eric Warrant ve Dan-Eric Nilsson yanıtı bildiklerini düşünüyorlar.[95] Yaptıkları hesaba göre derin okyanusta gözlerin derdi, getirinin az olmasıdır. Gözler büyüdükçe işlevlerini sürdürmeleri için gereken enerjinin maliyeti artar ama bu, görme gücünde ek olarak pek az artış getirir. Boyutlar 9 santimetreyi, yani kılıçbalığınınkileri aşınca daha fazla büyümelerinin pek anlamı kalmaz. Fakat ekip, aşırı büyük gözlerin sadece bir işi daha iyi yapabildiğini buldu: 500 metreden daha derin sulardaki büyük, ışıldayan cisimleri fark etmek. Bu ölçütleri sağlayan ve dev kalamarın gerçekten de görmesi gereken bir hayvan var: ispermeçet balinası.

Dünyadaki dişli yırtıcıların en büyüğü olan ispermeçet balinası, dev kalamarın başlıca hasmıdır. Midelerinin papağan gagasına benzeyen kalamar gagalarıyla dolu olduğu keşfedilmiştir. Bu balinaların kafalarında kalamar vantuzlarının tırtıklı kenarlarının bıraktığı yuvarlak yara izlerine sık rastlanır. Balinalar kendileri ışık üretmez ama batiskaf gibi

* Her ikisi de çok büyük olduğundan bu şekilde adlandırılan dev kalamar [*Architeuthis dux*] ve colossal kalamar [*Mesonychoteuthis hamiltoni*] farklı ailelere mensup iki türdür. (*ç.n.*)

küçük denizanalarına, kabuklulara ve planktona çarptıklarında biyolüminesan parlamaları tetiklerler. Dev kalamar, orantısız derecede büyük gözleriyle bu haberci ışıltıları 120 metre uzaktan görebilmesi sayesinde kaçacak zaman bulur. O, biyolüminesan bulutları görmesi *gereken* ve görebilecek kadar büyük gözlere sahip yegâne canlıdır. "Derinlerde başka hiçbir hayvan gerçekten büyük şeyler aramaz," diyor Johnsen. İspermeçet balinaları ve diğer dişli balinalar, yiyecek bulmak için görme duyusundan çok, sonar sistemini kullanır. Büyük köpekbalıkları genellikle daha küçük avların peşine düşer. Mavi balinalar küçük karideslere benzeyen kril ile beslenir. Mavi balinanın biyolüminesan bulutunu görmek krilin işine gelebilirdi ama bileşik gözlerinin çözünürlüğü çok sınırlıdır ve kril bu bilgiyle herhangi bir şey yapamayacak kadar yavaş hareket eder. Dev kalamar ve colossal kalamar, çok büyük yırtıcıları görmesi gereken, çok büyük ve eşsiz iki hayvandır. Bu benzersiz gereksinimleri benzersiz bir Umwelt yaratır. Var olan en büyük ve en hassas gözlere sahip bu iki canlı, taarruza geçmek üzere olan balinaların soluk pırıltılar saçan dış hatlarını görebilmek için Dünya'nın en karanlık ortamlarını tarar.*

Işıkları söndürürseniz dünya tek renk olur. Bunun sebebi, gözlerimizde iki tür fotoreseptör bulunmasıdır: koniler ve çubuklar. Koniler renkli görmemizi sağlar ama sadece aydınlıkta işlev görür. Karanlıkta, daha hassas hücreler olan çubuklar görevi devralır ve gündüz vaktinin renkli kaleydoskopu yerini gecenin siyah ve gri tonlarına bırakır.

---

* Dev kalamar bilindiği kadarıyla bütün okyanuslarda yaşayan küresel bir türdür. Fakat uzun zamandır sadece karaya vuran ölülerinden ötürü biliniyordu. Bu canlının doğadaki ilk fotoğrafları ancak 2004'te çekilebildi. Doğadaki ilk görüntüler 2012'de Widder ve meslektaşları tarafından, o zamanlar yeni geliştirilmiş Medusa kamerasıyla Japonya açıklarında çekildi.[96] Gizli kameranın ne kadar değerli olduğu yedi yıl sonra, New Orleans'ın 100 mil güneydoğusunda bir kez daha anlaşıldı. "Körfezin petrol platformlarıyla dolu bu bölümünde uzaktan kumandalı binlerce araç çalışıyordu," diyor Johnsen. "O pilotlar hiç dev kalamar görmemişlerdi, oysa biz beşinci denememizde bir tane gördük." (Oldukça şanslıydılar. Ekip kalamar görüntülerini yakaladıktan yarım saat sonra tekneye yıldırım düştü, cihazların çoğu yandı ama neyse ki Medusa'nın sabit sürücüsüne bir şey olmadı. Hemen sonrasında bir de hortum badiresi atlattılar.)

Biliminsanları bütün hayvanların geceleri bizim gibi renk körü olduğunu düşünüyordu.

Eric Warrant ve meslektaşı Almut Kelber, 2002'de fil şahin güvesiyle çok önemli bir deney yaptılar.[97] Avrupa'da yaşayan bu pembe-zeytuni renkli, güzel böceğin kanat açıklığı 7,5 cm'yi bulur. Sadece geceleri beslenir; çiçeğe konmadan havada asılı durarak uzun hortumuyla nektar içer. Kelber, şahin güvelerini, mavi ya da sarı kartların arkasına yerleştirdiği yemliklerden nektar içmeye alıştırdı. Bu renklerin besinle ilişkili olduğunu öğrenen güveler, onları grinin aynı derecede parlak tonlarından rahatlıkla ayırt edebiliyordu. Üstelik bunu, Kelber laboratuvarın ışıklarını kapattıktan sonra da yapabiliyorlardı.

Yarımay ışığına eşdeğer ışık düzeyinde Kelber'ın dünyası siyah-beyaza dönüşüyor ama güveler hâlâ nektarı bulabiliyordu. Bir keresinde "güveyi görebilmek için karanlık laboratuvarımda 20 dakika oturmam gerekti," diyor Kelber. "Hortumunu bile göremiyordum," ama güve doğru yemliklerden içmeye devam ediyordu. Işık, solgun yıldızlarınki kadar sönükleşip Kelber hiçbir şey göremez hale geldiğinde, fil şahin güvesi kartların renklerini hâlâ algılayabiliyordu. Fakat o renkler muhtemelen bizim algıladıklarımızdan çok farklıydı.

3.

Kmor, Ymor, Smor

Renk

Maureen ve Jay Neitze, bir oyuncak kaniş yavrusu almışlardı. "Her iyi ana baba gibi nasıl köpek yetiştirildiği hakkında bir kitap okuduk," diyor Jay. Kitaptaki iddiaya göre ideal köpek adları iki heceli olmalı ve sert sessizler içermeliydi. Neitze'ler birkaç seçenek üzerinde beyin fırtınası yaptılar ve Maureen, Jay'in görme duyusuyla ilgili araştırmalarına esprili bir gönderme yaparak Retina adını önerdi. (Retina'nın üç heceli olduğuna dikkat çekiyorum. "Evet ama bizim kullandığımız şekli iki heceliydi," diyor Jay. "Ret-na.") Siyah, yumuşacık ve çok sevimli bir köpek olan Retina tarihe geçti. O, türdeşlerinin aslında ne renk gördüğünü doğrulayan ilk köpeklerden biriydi.

1980'lerde Neitze'ler doktora yaptıkları sırada çoğu insan, köpeklerin renk körü olduğuna inanıyordu. *The Far Side*'ın yaratıcısı karikatürist Gary Larson, yatağının yanında "Annem, Babam, Re, Ginger, Tucker, ben ve ailenin geri kalanı renkli görsün" diye dua eden bir köpek çizmişti. Biliminsanları da bu fikre sorgusuz sualsiz inanıyordu. Bir ders kitabında "görünüşe göre primatlar dışındaki memelilerde genel olarak renkli görme yetisi bulunmadığı" iddia ediliyordu.[1] Ancak pek az tür dikkatle sınanmıştı ve onca sevilmelerine karşın köpekler de sınanmamışlar arasındaydı.[2] "İnsanlar bana hep köpeklerinin ne gördüğünü sorardı ama hakikaten hiçbir fikrimiz yoktu," diyor Jay. "Ya da fikrimiz vardı da delilimiz yoktu."

Jay o delili elde etmek için Retina'yla birlikte iki İtalyan tazısını laboratuvarına götürdü. Onlara, biri farklı renkte üç ışıklı panelin

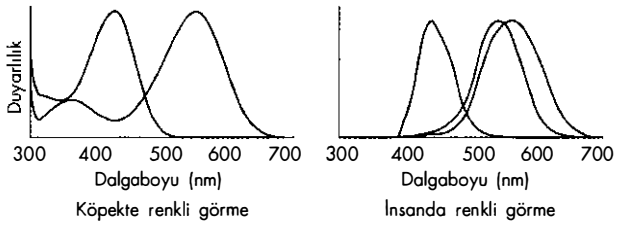
önünde oturmayı öğretti. Farklı renkteki panele burunlarıyla dokunduklarında peynirli ödül maması kazanıyorlardı. Bunu defalarca tekrarladılar. Köpekler renkli görür.[3] Sadece çoğu insanla aynı renk aralığında görmezler. Diğer hayvanlar da çoğunlukla böyledir. Onların farklı görsel paletlerini kavrayabilmek için öncelikle rengin ne olduğunu, hayvanların renkleri nasıl gördüğünü ve *neden* renkli görecek şekilde evrim geçirdiklerini anlamalıyız. Renkli görme o kadar karmaşıktır ki az sonra yapacağım basitleştirilmiş açıklama dahi soyut ve kafa karıştırıcı görünebilir. Ama sabırlı olun: Kuşları, kelebekleri ve çiçekleri gerçekten anlamanın sırrı ayrıntılarda yatar. Ayrıca gülü seven dikenine katlanır.

Işık farklı dalgaboyları halindedir.[4] Biz, menekşe rengi* olarak algıladığımız 400 nanometre ile kırmızı olarak algıladığımız 700 nanometre arasındaki dalgaboylarını görebiliriz. Bu dalgaboylarını ve aralarındaki gökkuşağını saptama becerimiz, hayvanlarda görmenin temelini oluşturan opsin proteinlerine bağlıdır. Opsinler çeşit çeşittir ve her biri belli bir dalgaboyunu en iyi şekilde soğurur. İnsanlarda normal renkli görme, her biri retinamızdaki farklı bir koni hücresi türünün kullandığı üç farklı opsine bağlıdır. Opsinler (ve onları içeren koniler) en fazla soğurdukları dalgaboylarına göre uzun, orta ve kısa dalgaboyuna duyarlı olanlar ya da daha alışılageldik şekliyle kırmızı, yeşil ve mavi olarak sınıflandırılır.† Işık bir yakuttan yansıyıp gözümüze girince uzun dalgaboyuna duyarlı (kırmızı) konileri güçlü, orta dalgaboyuna duyarlı (yeşil) olanları orta derecede ve kısa dalgaboyuna duyarlı (mavi) olanları zayıf biçimde uyarır. Işık safire çarpıp yansırsa tam tersi olur ve kısa dalgaboyuna duyarlı (mavi) koniler en güçlü, diğerleri daha zayıf tepki verir.

---

* İngilizcede kullanılan "violet" ve "purple" sözcüklerinin her ikisi için de Türkçede genellikle "mor" karşılığını kullanıyoruz. Ancak "violet" ışık spektrumundaki belli bir dalgaboyunu, "purple" ise kırmızıyla mavinin karışımından oluşan bir rengi ifade ettiği ve metinde her ikisi de kullanıldığı için çeviride "violet" sözcüğü için "menekşe", "purple" için "mor" sözcüklerini kullanmayı tercih ettik. (*ç.n.*)

† Teknik olarak, uzun ve kısa dalgaboyuna duyarlı konilerin, en fazla uyarıldıkları dalga boylarına göre aslında kırmızı ve mavi değil, sarı-yeşil ve menekşe olarak adlandırılması gerekir.



Eğrilerden her biri bir koni hücresi sınıfını temsil eder; her eğrinin tepesi koninin en duyarlı olduğu dalgaboyunu gösterir. Köpeklerde iki, insanlardaysa üç koni sınıfı bulunur.

Fakat renkli görme, farklı dalgaboylarındaki ışığı *saptamaktan* öte, *karşılaştırmayı* gerektirir. Karmaşık bir nöron ağı, üç koni çeşidinden gelen sinyalleri toplayıp çıkarır. Bu nöronlardan bazıları, kırmızı konilerden gelen girdilerle uyarılırken yeşillerden gelen girdiler tarafından ketlenir; bunlar kırmızılarla yeşilleri birbirinden ayırt etmemizi sağlar. Bazı nöronlarsa mavi koniler tarafından uyarılır ama kırmızı *ve* yeşil olanlar tarafından ketlenir; bunlar da mavilerle sarıları birbirinden ayırt etmemizi sağlar. Bu basit matematik –K - Y ve M - (K + Y)– karşıt süreç olarak adlandırılır. Böylece sadece üç koniden gelen ham sinyaller algıladığımız muhteşem gökkuşağına dönüşür.

Karşıt süreç, renkli görmenin (neredeyse) bütününün temelini oluşturur. Bir hayvan, karşıt süreç olmadan renkleri gerçekten de hayal ettiğimiz gibi görmez. Örneğin *Daphnia* denen su pirelerinde turuncu, yeşil, menekşe ve ultraviyole* dalgaboylarına duyarlı dört çeşit opsin bulunur.[5] Fakat bu dalgaboyları sadece programlanmış ve hemen hemen reflekse dayalı tepkileri tetikler. Ultraviyole, güneş demek; öyleyse uzaklaş. Yeşil ve sarı, yiyecek demek; öyleyse yaklaş. Su pireleri, *bizim* renkli gördüğümüz dört özgül ışık türüne tepki verir. Fakat

* "Violet" karşılığı olarak "menekşe" sözcüğünü kullandığımız için tutarlılığı korumak adına "ultraviolet" karşılığı olarak "morötesi" terimini kullanmadık. "Menekşe ötesi" gibi alışılmadık bir ifadeyi tercih etmediğimiz için "ultraviyole" terimini kullandık. (*ç.n.*)

dört opsinden gelen sinyalleri karşılaştıramadıkları için bir spektrum algılayamazlar.

O halde renk temelde özneldir. Otun kendisi ya da yansıttığı 550 nanometre dalgaboyu, doğası gereği "yeşil" değildir. Bu fiziksel özelliği fotoreseptörlerimiz, nöronlarımız ve beynimiz yeşile dönüştürür. Renk, gözün ve beynin sahibinde var olan bir şeydir. Oliver Sacks ve Robert Wasserman'ın "Renk Körü Ressam Vakası"nda anlattıkları sanatçı Jonathan I.'ın hikâyesini ele alalım.[6] Renkleri gören ve resmeden sanatçının dünyası, yıllar sonra geçirdiği beyin hasarının ardından tek renk (monokrom) bir dünyaya dönüşmüştü. Retinası sağlıklıydı, opsinleri vardı ve konileri çalışıyordu. Ama beyni sadece siyahların, beyazların ve grilerin dünyasını canlandırabiliyordu. Gözleri kapalıyken hayal ettiği dünya bile renklerden yoksundu.

İnsanların küçük bir kısmı ve bazı hayvan türlerinin tamamı yalnızca gri tonlarda görür ve bunun nedeni beyin hasarı değil, retina düzeneğini renkli görmeye uygun olmamasıdır. Bu bireylere monokromat denir. Tembel hayvanlar ve armadillolar gibi bazı hayvanların yalnızca loş ışıkta iyi çalışan, ancak renk algılamaya yönelik olmayan çubuk hücreleri vardır.[7] Rakunlar ve köpekbalıkları gibi hayvanlardaysa tek çeşit koni hücresi bulunur ve renkli görme karşıtlık sürecine dayandığından, tek çeşit koni pratikte hiç olmamasıyla aynı sonucu verir.[8] Balinalarda da tek tip koni bulunur.[9] Görme duyusu uzmanı Leo Peichl'ın da dediği gibi, okyanus bir mavi balinaya mavi görünmez. Koni hücreleri omurgalılara özgüdür ama diğer hayvanların dalgaboyuna özgü fotoreseptörleri de benzer rol oynar. Ahtapot, kalamar ve mürekkepbalıkları gibi kafadanbacaklılarda böyle tek bir fotoreseptör sınıfı bulunur, dolayısıyla şaşırtıcı olmakla beraber bu hayvanlar da monokromattır.[10*] Hızla renk değiştirebildikleri halde bu renk değişimini kendileri göremezler.

Hayvanlar arasında monokromasinin bu denli yaygın olması, renkli görmeyle ilgili en olmayacak sonuçlardan birine işaret eder: Renkli görmenin gerekli olmadığına. Hayvanların gözlerini kullanarak yaptıkları hemen her şey –yön bulma, yiyecek arama, iletişim– sadece grinin tonları görülerek de yapılabilir. Öyleyse renkli görme hangi amaca hizmet eder?

---

* Ateşböceği kalamarı bir istisnadır. Bu kalamar üç farklı fotoreseptör sınıfı taşıdığı bilinen tek kafadanbacaklıdır ve renkli görüyor olabilir.[11]

Fizyolog Vadim Maximov'a göre bu sorunun yanıtı, yaklaşık 500 milyon yıl öncesinde, günümüzdeki hayvan gruplarının ortaya çıktığı Kambriyen döneminde yatıyor olabilir.[12] Bu atasal hayvanların birçoğu, etraflarında güneş ışınlarının kırpıştığı sığ sularda yaşıyordu. Suda titreşen ışınlar modern gözlerimize hoş görünür ama eski çağların monokromatik gözlerine inanılmaz ölçüde kafa karıştırıcı gelmiş olsa gerek. Suyun belli bir noktasında parlaklık anbean yüzlerce kez değişiyorsa böyle bir arkaplanda önemli nesneleri fark etmek çok zorlaşır. Az önce beliren şu karaltı, yaklaşan bir yırtıcının mı yoksa sadece bir an için bulutun arkasında kalan güneş ışınının gölgesi mi? Sadece aydınlık ve karanlıkla ilgilenen monokromatik gözlerin bunu söylemesi zor. Oysa renkli gören gözler bu soruya çok daha rahat yanıt verir. Çünkü farklı dalgaboyları, toplam ışık miktarı arttığı ya da azaldığı zaman bile aynı nispi oranları korumaya eğilimlidir. Parlak güneş ışığında kırmızı görünen bir çilek gölgede de kırmızı görünür ve yeşil yaprakları, günbatımının kızıllığında da hâlâ bariz biçimde yeşildir. Renk ve özellikle de karşıt sürecin işlediği renkli görme, *istikrar* sağlar. Bir hayvan farklı dalgaboylarına ayarlı fotoreseptörlerin çıktılarını karşılaştırabiliyorsa ışığın dans ettiği ve kırpıştığı bir dünyada görürken istikrarı koruyabilir. Yalnız iki fotoreseptör sınıfı bile olsa yeter. Renkli görmenin en basit biçimi olan dikromasinin temeli buna dayanır. Retina'nın, diğer köpeklerin ve memelilerin çoğu bu özelliğe sahiptir.

Köpeklerde iki çeşit koni bulunur.[13] Bunlardan biri uzun dalgaboyuna hassas olan sarı-yeşil opsin, diğeri kısa dalgaboyuna hassas olan mavi-mor opsin içerir. Köpekler çoğunlukla mavi, sarı ve gri tonlarda görür. Korgi ırkı köpeğim Typo kırmızı-mor oyuncağına bakarken kırmızıyı muhtemelen koyu kirli bir sarı, laciverdiyse mor olarak görür. Çiğnemeye bayıldığı yeşil halkaya baktığı sırada yeşil, konilerinin her ikisini de eşit derecede uyarır. Karşıt süreç nedeniyle bu sinyaller birbirinin etkisini yok eder ve Typo halkayı beyaz görür.

Atlar da dikromattır ve konileri, bir köpeğinkilerle çok benzer dalgaboylarına duyarlıdır. Bu da atların, yarış parkurlarındaki engelleri belli etmek için kullanılan turuncu işaretleri seçmekte zorlandığı anlamına gelir.[14] Bu turuncu işaretler trikromatik insanın dikkatini çeker ama Sarah Catherine Paul ve Martin Stevens'ın gösterdiği üzere, bir

atın dikromatik gözlerine arkaplanda kaybolmuş görünür. Yarış parkurlarını atların görme duyusuna uygun tasarlamış olsaydık fosforlu sarı, canlı mavi ya da beyaz işaretler seçmemiz gerekirdi.

Yarış parkurlarını insanın *kapsamlı* görme duyusuna göre tasarlasaydık muhtemelen yine aynı şeyi yapardık. "Renk körü" insanların çoğu, normalde bulunması gereken üç çeşit koniden biri eksik olduğu için dikromattır. Renkli görürler ama gördükleri renkler daha dar bir aralıktadır. Renk körlüğü pek çok farklı biçimde karşımıza çıkar ama köpekler ve atlar gibi görmeye en fazla yaklaşanlar, orta dalgaboyuna hassas yeşil konileri olmayan döteranoplardır. Onların gözünde dünya sarılar, maviler ve grilerle boyanmıştır; kırmızı ve yeşilleri ayırt etmek zordur. Trafik ışıkları, elektrik tesisatı ve renk katalogları renk körleri için kafa karıştırıcı olabilir.[15] Ambalajları ya da çizelgeleri okumakta, görünüşte farklı renk forma giyen spor takımlarını ayırt etmekte ya da çok basitmiş gibi görünmesine rağmen resim dersinde gökkuşağı çizmekte zorlanabilirler. Bazı ülkelerde renk körlerinin uçak kullanması, orduya yazılması, hatta araba kullanması yasaktır. Renk körlüğü bir sakatlık olmamasına rağmen, insan kültürleri trikromasiye dayalı olduğundan, öyleymiş gibi algılanabilir. Peki trikromasiyi bu kadar özel kılan ne ki çoğu insanda bu özellik var? Mademki dikromasi memelilerin çoğu için yeterli, biz niye diğer primatlardan farklıyız? Gördüğümüz renkleri niye görüyoruz?

İlk primatların dikromat olduğu neredeyse kesindir.[16] Biri kısa, diğeri uzun dalgaboyuna hassas iki konileri vardı. Köpekler gibi mavi ve sarı tonlarını görüyorlardı. Ama 29-43 milyon yıl önce bir primat soyunun Umwelt'ini kalıcı biçimde değiştiren bir kaza oldu. Uzun dalgaboyuna hassas opsini üreten genin bir kopyası daha oluştu. Hücreler bölünür ve DNA kopyalanırken bu tür ikilenmeler (duplikasyon) sık olur. İkilenmeler aslında birer hatadır ama genin fazladan bir kopyasını, orijinal genin işleyişini bozmadan kurcalamak üzere evrime sundukları için şans yaver gider. Uzun dalgaboyuna hassas opsin geninde olan da tamı tamına buydu.[17] 560 nanometre dalgaboyunu soğuran kopya aşağı yukarı aynı kaldı. Diğeriyse daha kısa olan 530 nanometre dalgaboyuna kayarak, orta dalgaboyuna hassas (yeşil) opsin dediğimiz kopyayı meydana

getirdi. Bu iki gen yüzde 98 oranında özdeştir ama aralarındaki yüzde 2'lik uçurum, mavi ve sarı tonlarında görme ile karışıma kırmızı ve yeşillerin eklenmesi arasındaki farkı yaratır.* Uzun ve kısa dalgaboyuna hassas önceki opsinlere, orta dalgaboyuna hassas yeni opsinlerin eklenmesiyle bu primatlarda trikromasi gelişti. Onlar da renk skalası genişleyen görme yetilerini Afrika, Asya ve Avrupa'nın kuyruklu maymunlarına ve bizi de içeren kuyruksuz maymunlara miras bıraktılar.

Bu hikâye renkleri *nasıl* görmeye başladığımızı açıklıyor ama *neden* renkli gördüğümüzü açıklamıyor. Uzun dalgaboyuna hassas opsin geninin ikinci kopyasının orta dalgaboyuna kaymasının sebebi tam olarak neydi? Cevap bariz görünüyor: Daha fazla renk görebilmek için. Bir monokromat, siyahla beyaz arasında kabaca yüz gri tonunu ayırt edebilir. Bir dikromatta buna, sarıdan maviye doğru yaklaşık yüz kademe daha eklenir ve gri tonlarının sayısıyla çarpıldığında, algılanabilir on binlerce renk oluşturur. Bir trikromatta buna, kırmızıdan yeşile yüz kademe daha eklenir ve dikromatın renk kümesiyle çarpıldığında renk sayısı milyonlara ulaşır. Fazladan her opsinle, görsel paletteki renk sayısı katlanarak artar.[18] Peki ama on binlerce renk dikromatların rahat rahat yaşamasına yetiyorsa milyonlarca rengin trikromatlara faydası nedir?

Biliminsanları 19. yüzyıldan beri, trikromatların yeşil yapraklar arasındaki kırmızı, turuncu ve sarı meyveleri daha rahat fark edebileceğini ileri sürmüştü.[19†] Son zamanlarda bazı araştırmacılar, trikromasinin daha çok, yağmur ormanlarında protein bakımından zengin ve körpeyken kızarma eğilimi gösteren besleyici yaprakları bulmayı sağladığı için avantajlı olduğunu ileri sürdüler.[20] Bu açıklamalar birbirini dışlamaz.

---

* Orta ve uzun dalgaboyuna hassas opsin genlerinin her ikisi de X kromozomu üzerinde bulunur. İki X kromozomu olan bir kişide, bu iki genden birinin hatalı bir kopyasının olması genellikle bir sorun teşkil etmez. Ama bir X ve bir Y kromozomu olan kişiye hatalı kopya aktarılmışsa durum değişir. O nedenle, M (orta) ya da L (uzun) konilerden birinin kaybından kaynaklanan kırmızı-yeşil renk körlüğü, kadınlara kıyasla erkeklerde daha yaygındır.

† Renkli görme üzerine çalışmalar yapan Kentaro Arikawa, kendisinde kırmızı-yeşil görme kusuru olduğunu ilk kez altı yaşındayken fark etmiş. Kahvaltı için bahçeden çilek toplamasını isteyen annesini hayal kırıklığına uğratmış. Laboratuvar deneylerinde trikromatlar, meyveleri bulmada dikromatlara göre daha başarılıdır.

Primatların çoğu meyve yer ama meyvenin bulunmadığı ya da ham olduğu zamanlarda daha büyük türler körpe yapraklarla idare edebilir. Primatların görme duyusunu (ve bazen, son bölümde gördüğümüz zebraların çizgilerini) araştıran Amada Melin bunun "trikromasinin evrimi için mükemmel ortam" olduğunu söylüyor. "Hem ana yemeğinizi hem de yedek yemeğinizi bulmanız açısından faydalıdır."*

Amerika maymunları bu hikâyeyi daha da karmaşık hale getirir. Onlarda da trikromasi gelişmiştir ama bambaşka bir yol izleyerek ve çok farklı sonuçlar doğurarak. Gerald Jacobs 1984'te, bazı sincap maymunlarının kırmızı ışığa duyarlı, diğerlerininse duyarsız olduğunu fark etti.[21] Jay Neitze'nin yardımıyla bunun sebebini buldu. Bu maymunlarda uzun dalgaboyuna hassas opsin geninin ikinci bir kopyası gelişmemişti.[22†] Onun yerine günümüzde orijinal genin birkaç farklı versiyonu bulunur ve bunların bir kısmı hâlâ uzun dalgaboyuna, bir kısmıysa orta dalgaboyuna hassas konileri üretir. Bu gen de X kromozomu üzerinde bulunur; yani erkek (XY kromozomuna sahip) maymunlar kalıtsal olarak versiyonlardan sadece birini alabilir. İster orta ister uzun dalgaboyuna hassas versiyonu taşıyor olsun, erkek maymunlar her halükârda dikromasiye mahkûmdur. Ne var ki dişi maymunlar XX kromozomu taşır. O nedenle bazı dişiler kalıtsal olarak *hem* orta *hem de* uzun dalgaboyunun hassas versiyonları alır. Bu da onlara trikromasi özelliğini kazandırır.‡ Dolayısıyla bu maymunlar ağaç tepelerinde hoplaya zıplaya

---

* Primatların görme keskinliğinin de olağanüstü olması trikromasinin niye meyve ya da yaprak yiyen diğer hayvanlarda da gelişmediğini açıklar. "Bir fareye trikromasi özelliğini kazandırabilirsiniz ama görme keskinliği zayıf bir gece hayvanına bunun ne faydası olur ki?" diyor Melin. Keskin gözlü primatlarsa tersine, meyveleri ve taze yaprakları uzaktan görmek ve rakipleri tarafından fark edilmeden onlara ulaşmak için trikromasiden faydalanabilir.

† Uluyan maymunlar istisnadır. Bu maymunlar Amerika kıtasında yaşar ama aynı kıtayı paylaştıkları diğer maymunların tersine ister dişi olsun ister erkek hepsi trikromattır çünkü trikromasi, Afrika ve Avrasya'daki kuzenlerinde olduğu gibi (ama onlardan bağımsız olarak) uzun dalgaboyuna duyarlı opsin geninde oluşan ikilenmeyle gelişmiştir.[23]

‡ Durum bundan da karışıktır çünkü Amerika maymunlarının birçoğunda aynı genin üç olası versiyonu bulunabilir. Dişilerde üç versiyondan ikisi ya da aynı versiyondan bir çift gen bulunur; yani bu maymunlarda renkli görme, üç dikromasi ve üç trikromasi olmak üzere altı farklı biçimde olabilir.[24]

dolaşıp yiyecek ararken, bir kısmı yeşil yapraklar arasındaki kırmızı meyveleri, diğerleriyse sadece sarı ve gri tonlarını görür. Erkek ve kız kardeşler bile renkleri farklı algılayabilir.

Bu durumda dikromatların dezavantajlı olduğu düşünülebilir. Ancak Amanda Melin, Costa Rica ormanlarında 15 yıl boyunca beyaz yüzlü kapuçinler üzerinde çalıştıktan sonra farklı düşünüyor. Birkaç maymun grubunu izleyen Melin, her bireyi görür görmez tanımayı öğrenmişti. Maymunların dışkılarını toplayıp DNA dizilemesi yaparak hangilerinin trikromat, hangilerinin dikromat olduğunu saptadı. Gruplardan hiçbirinin hayatta kalma ya da üreme açısından diğerlerine göre avantajlı olmadığını keşfetti.[25] Trikromatlar canlı renkli meyveleri bulmakta gerçekten daha iyiydi ama dikromatlar da yapraklar ve dallar arasında gizlenen böcekleri bulmakta daha başarılıydı.[26] Dikromatlar kafa karıştırıcı ya da dikkat dağıtıcı rengârenk bir ortam yoksa, sınırları ve biçimleri daha iyi saptar, kamufle olanı daha iyi görürler. Melin onları, bir trikromat olan kendisinin bile fark etmediği böcekleri yakalarken izledi. Fazladan renk görmenin faydaları olduğu kadar dezavantajları da vardır. Bir şeyin daha fazla olması her zaman daha iyi olduğu anlamına gelmez; zaten bu yüzden dişilerin bir kısmı ve erkeklerin hepsi hâlâ dikromattır.

Aslında erkeklerin *hemen hemen* hepsi demeliyim. Neitze'ler 2007'de iki ergin sincap maymununa insandaki uzun dalgaboyuna hassas opsin genini ekleyerek, iki yerine üç koniye sahip trikromatlara dönüştürdüler.[27] Dalton ve Sam adlı bu iki maymun, iki yıldan beri her gün tabi tutuldukları testlerde birdenbire farklı davranmaya başladılar; daha önce göremedikleri yeni renkleri artık ayırt edebiliyorlardı. Dalton, deneyden kısa bir süre sonra diyabet nedeniyle öldü. Ama Nisan 2019'da Jay'le konuştuğumuzda, Sam 12 yıldır trikromat olarak yaşıyordu. Hayatı nasıl gidiyor acaba diye düşündüm. Farklı mı davranıyordu? Meyvelere başka türlü tepkiler mi veriyordu? "Onunla konuşmaya çalıştım," diyor Jay gülerek. "Ne kadar muhteşem olduğu hakkında. İlginç olan da bu, değil mi? Ama onun umurunda bile değil."

Bence Sam konuşmasa da çok şey söylüyor. Bize, daha çok renk görmenin tek başına bir üstünlük kazandırmadığını hatırlatıyor. Renkler doğaları nedeniyle sihirli değillerdir. Hayvanlar onlardan bir anlam

çıkarıyorsa renkler sihirli hale gelirler. Kimi renkler bizim için özeldir çünkü onlara, trikromat atalarımızdan miras aldığımız görme yetimizden ötürü sosyal bir önem atfederiz. Tersine, kimi renkleri hiç umursamayız. Hatta bazı renkleri göremeyiz bile.

Banker, arkeolog ve hezarfen John Lubbock, 1880'lerde bir ışık ışınını prizmayla ayırdı ve ortaya çıkan gökkuşağını karıncaların üzerine düşürdü.[28] Karıncalar ışıktan kaçtılar ama Lubbock onların, gökkuşağının menekşe rengi ucunun ardındaki bölgeden de kaçtığını fark etti. Lubbock'a karanlık görünen bu bölge karıncalara öyle görünmüyordu. Burada ultraviyole (UV) ışık yoğundu. UV ışığın dalgaboyu 10-400 nanometre arasında değişir.* İnsanlar için büyük ölçüde görünmezdir ama basiretli davranan Lubbock, "Karıncalara (hakkında en ufak bir fikrimizin olmadığı) farklı ve ayrı bir renk olarak görünüyor olmalı," diye yazmıştı. "Anlaşılan, nesnelerin renkleri ve doğanın genel görüntüsü onlara, bize sunduğundan çok farklı bir görünüm sunuyor."

O zamanlar bazı biliminsanlarına göre hayvanlar ya renk körüydü ya da bizimle aynı spektrumu görüyordu.[30] Lubbock karıncaların bir istisna olduğunu gösterdi. Elli yıl sonra arıların ve golyan balıklarının da UV ışığı görebildiği ortaya çıktı. Bunun üzerine söylem değişti: *Bazı* hayvanlar, bizim göremediğimiz renkleri görebilir ama bu, çok nadir bir beceri olsa gerek. Fakat bir elli yıl daha geçti ve 1980'lerde araştırmacılar birçok kuş, sürüngen, balık ve böceğin UV'ye duyarlı fotoreseptörlerinin olduğunu gösterdi.[31] Söylem yine değişti: Birçok hayvan grubu UV'yi görebilir ama memeliler göremez. Yine yanılıyorlardı: 1991'de Gerald Jacobs ve Jay Neitze fare, sıçan ve gerbillerde UV'yle uyumlu, kısa dalgaboyuna hassas koniler bulunduğunu gösterdi.[32] Tamam, peki,

* Elektromanyetik spektrumun sadece küçük bir parçasını oluşturan görünür ışığın, gözlerimizin saptayabildiği tek aralık olmasının sebepleri var. Gama ışınları ve X ışınları gibi çok kısa dalgaboylu elektromanyetik dalgalar atmosfer tarafından büyük ölçüde soğurulur. Mikrodalgalar ve radyo dalgaları gibi dalgaboyu çok uzun olanlarsa opsinleri güvenilir biçimde uyarmaya yetecek enerjiye sahip değildir. Bu nedenle, hiçbir hayvan mikrodalgaları ya da X ışınlarını göremez. Görmeye elverişli dalgaboyları, 300-750 nanometre arasındaki dar bir bantta yer alır.[29] 400-700 nanometre aralığında çalışan gözlerimiz bu bandın büyük bölümünü kapsar. Ancak sınırlarda pek çok şey olabilir.

memeliler UV'yi *görebilir* ama sadece kemirgenler ve yarasalar gibi küçük memeliler. Hiç de değil: 2010'larda Glen Jeffery, ren geyiğinin yanı sıra köpeklerin, kedilerin, domuzların, ineklerin, feretlerin ve başka pek çok memelinin kısa mavi konilerle UV'yi saptayabildiğini buldu.[33] Bu hayvanlar UV'yi muhtemelen ayrı bir renk olarak değil, mavinin koyu bir tonu olarak görür ama öyle ya da böyle UV'yi algılarlar. Bunu bazı insanlar da yapabilir.

Merceğimiz UV'nin göze girmesini engeller ama ameliyat ya da kaza nedeniyle merceğini kaybeden insanlar UV'yi beyazımsı mavi olarak algılayabilir. Sol merceğini 82 yaşında kaybeden ressam Claude Monet de onlardan biriydi.[34] Monet, nilüferlerden yansıyan UV ışığı görmeye ve resimlerinde beyaz yerine beyazımsı mavi kullanmaya başlamıştı. Monet bir yana, insanların çoğu UV'yi göremez ve muhtemelen bu yüzden biliminsanları bunun nadir bir beceri olduğuna inanmaya böylesine isteklidir. Oysa tam tersine, renkli görebilen hayvanların çoğu UV'yi görebilir.[35] Normal olan budur; acayip olan biziz.*

UV'yi görme yetisi o kadar yaygındır ki diğer hayvanların çoğu doğanın büyük bölümünü bizden farklı görüyor olsa gerek.† Su, UV ışığı dağıtarak bir ultraviyole sis yaratır ve balıklar bu ortamda UV'yi soğuran minik planktonu daha kolay görebilir. Kemirgenlerse UV bakımından zengin gökyüzünde uçan kuşların karanlık siluetlerini daha kolay görebilir. Ren geyikleri, UV'yi yansıtan karla kaplı yamaçlarda yaşayan ve UV'yi pek az yansıtan yosunlarla likenleri çabucak fark edebilir.[37] Dahası da var.

---

* Neden insanların çoğu UV'yi görmez? Bu durum, keskin görmenin bedeli olabilir. Işık her iki merceğimizden geçerken kısa dalgaboyları daha dar açıyla kırılır. Mercek UV'nin geçmesine izin verseydi bile bu dalgaboylarını diğerlerinin çok önünde bir noktaya odaklayacak ve retinadaki görüntü bulanık olacaktı. Buna kromatik aberasyon denir. Küçük ya da çok keskin olması gerekmeyen gözler için önemli olmayan bu durum, keskin gören büyük gözlü hayvanlar için sorun teşkil eder. Primatların UV'yi görememesi, yırtıcı kuşlarınsa diğer kuşlara nazaran çok daha az görmesi bundan kaynaklanıyor olabilir.

† Bazı biliminsanları evrim sürecinde ilk gelişen renkli görme türünün, yeşile ve UV'ye duyarlı iki fotoreseptörün rol aldığı dikromasi olduğunu düşünüyor.[36] Bu doğruysa hayvanlar renkli görmeye başladığından beri UV'yi de görüyor demektir.

Çiçekler, polinatörlere kendilerini göstermek için çarpıcı UV desenler kullanır.[38] Ayçiçeklerinin, kadife çiçeklerinin ve rudbekyaların hepsi insana aynı görünür ama arılar, taç yapraklarının dibinde dikkat canlı renklerde hedefler oluşturan UV lekeleri görebilir. Bunlar genellikle nektarın yerini gösteren kılavuzlardır. Bazen de birer tuzaktır. Yengeç örümcekleri çiçeklerin üstünde pusu kurarak polinatörleri tuzağa düşürür.[39] Bize kendi renklerine uygun çiçekleri seçiyormuş gibi görünen bu örümceklerin uzun zaman birer kamuflaj ustası olduğu düşünülmüştü. Fakat bir yengeç örümceği UV'yi o kadar fazla yansıtır ki bir arı için gayet görünürdür ve üzerinde bulunduğu çiçeği çok daha cazip gösterir. Bazıları çiçeğin üzerinde kamufle olmaktan çok, kendini belli ederek UV'ye hassas avını çeker.

Birçok kuşun tüylerinde de UV desenler bulunur. 1998'de iki bağımsız ekip, mavi baştankaraların "mavi" tüylerinin büyük bölümünün aslında UV'yi yoğun biçimde yansıttığını fark etti.[40] Ekiplerden birinin yazdığı gibi, "Mavi baştankaralar ultraviyole baştankaralardır." Bu kuşların hepsi insanlara az çok aynı görünür. Ama UV desenlerinden ötürü erkeklerle dişiler aslında birbirinden çok farklıdır. Aynı durum, kır kırlangıçları ve alaycıkuşlar gibi cinsiyetini ayırt edemediğimiz ötücü kuşların yüzde 90'ından fazlası için geçerlidir.[41]

UV'yi göremeyen tek canlı insan değil. Su UV ışığı dağıttığı için uzaktaki avını görmesi gereken yırtıcı balıklar genellikle UV'ye duyarsızdır. Buna karşılık avları, onların bu zaafından faydalanır. Orta Amerika'nın nehirlerinde yaşayan kılıçkuyruk bize tekdüze görünür ama Molly Cummings ve Gil Rosenthal'ın gösterdiği üzere, bazı türlerin erkeklerinin, her iki yanında ve kuyruğunda UV'yi güçlü biçimde yansıtan şeritler bulunur.[42] Bu işaretler dişileri cezbeder ama kılıçkuyruğu avlayan başlıca yırtıcılar için görünmezdir. Yırtıcıların daha yaygın olduğu yerlerde kılıçkuyrukların UV işaretleri daha da belirgindir. Tehlikeyi üzerlerine çekmedikleri gibi, "süper göz alıcı olmak da yanlarına kalır," diyor Cummings. Benzer gizli şifrelere Avustralya'nın Büyük Set Resifi'nde de rastlanır. Yüzgeçli bir limona benzeyen Ambon damsel balığı yakın akraba olduğu türlere tıpatıp benzer. Fakat Ulrike Siebeck, bu balığın yüzünde sanki görünmez bir maskara sürülmüş gibi UV şeritler bulunduğunu keşfetti.[43] Yırtıcılar bu işaretleri göremez ama

balığın kendisi, işaretlere bakarak kendi türünü akraba türlerden ayırt eder.

UV bize esrarengiz ve büyüleyici gelir. O, görüşümüzün sınırındaki görünmez bir renk tonu, hayal gücümüzün doldurmaya heveslendiği algısal bir boşluktur. Biliminsanları genellikle özel ve gizli bir anlam atfettikleri UV'yi gizli bir iletişim kanalı olarak gördüler.[44] Ama Ambon damsel balığı ve kılıçkuyruklar dışında bu iddiaların çoğu boşa çıktı.* Gerçek şu ki UV görüşü ve UV sinyaller son derece yaygındır. Renkli görme üzerinde çalışan Innes Cuthill, "Şahsen, ultraviyolenin sadece başka bir renk olduğunu düşünüyorum," diyor.

Acaba yerimizde bir arı olsa ne düşünürdü? Arılar trikromattır ve opsinleri en çok yeşil, mavi ve ultraviyoleye hassastır. Belki de bilimarıları, bizim görebildiğimiz ama kendilerinin göremeyip "ultrasarı" olarak adlandırabileceği kırmızıya hayretle bakardı. İlk başta belki diğer canlıların ultrasarıyı göremediğini ileri sürer ama sonraları, nasıl olup da pek çoğunun görebildiğini merak ederlerdi. Ultrasarının özel bir yanı olup olmadığını sorarlardı. Belki ultrasarı kameralarla çektikleri gül fotoğraflarına bakıp bu çiçeklerin ne kadar farklı göründüğünü heyecanla birbirlerine anlatırlardı. Belki de bu rengi görebilen, iki ayaklı büyük hayvanların yanakları kızardığında gizli bir mesaj alışverişi yapıp yapmadığını merak ederlerdi. Sonunda ultrasarının aslında yalnızca başka bir renk olduğunu ve bu rengi göremedikleri için kendilerine özel geldiğini anlarlardı belki. Ve ultrasarıyı kendi Umwelt'lerine ekleyebilselerdi üç boyutlu renk dünyalarına dördüncü boyutu katmanın nasıl bir şey olacağını merak ederlerdi.

Colorado'nun Elk Dağları'nda, 2.900 metre yükseklikte bulunan Gothic kasabası bir zamanlar, gelişmekte olan bir gümüş madenine ev sahipliği yapıyordu. On dokuzuncu yüzyılın sonlarında gümüş aniden

* UV'yi görmeyle ilgili başka iddialar da çökmüştür. Finli bir ekip 1995'te, çayır farelerinin idrarından yansıyan UV sayesinde kerkenezlerin onları takip edebildiğini ileri sürdü.[45] Bu iddia kitaplarda ve belgesellerde sık sık tekrarlanmış olmasına rağmen "yanlıştır," diyor Almut Kelber. Kelber ve meslektaşları 2013'te çayır faresi idrarının UV'yi pek fazla yansıtmadığını ve sudan ayırt edilemediğini gösterdiler.[46] Kerkenezler muhtemelen idrarı uzaktan göremez.

değer kaybedince hayalet kasabaya dönüştü. Fakat 1928'de, onca şey dururken, bir araştırma istasyonu olarak yeniden doğdu. Rumble adıyla bilinen Rocky Mountain Biyoloji Laboratuvarı, günümüzde dünyanın dört bir yanındaki biliminsanları için çekim merkezi haline gelmiştir. Yüzlerce biliminsanı yaşamak, çalışmak ve yerel toprakları, akarsuları, keneleri ve marmotları araştırmak için her yaz, bir Western filminin seti gibi görünen bu yere göç eder. Mary Caswell "Cassie" Stoddard, 2016'da buraya geldiğinde aklında sinekkuşları varmış.

"Kuşları gözlemleyerek büyüdüm ama üniversiteye gidene dek, insanların algılayamadığı renkleri algılayabildiklerini bilmiyordum," diyor Stoddard. "Akıl almaz bir şeydi." Kuşların çoğunda en fazla kırmızı, yeşil, menekşe rengi ve UV'ye duyarlı opsinleri içeren dört çeşit koni hücresi bulunur. O nedenle bu kuşlar *tetrakromattır*. Teoride bizim algı sınırlarımızın dışında kalan pek çok rengi ayırt edebilirler. Stoddard ve ekibi, bunun doğru olup olmadığını anlamak için Rumble'ın sakinlerinden, yanardöner yeşil tüyleriyle gösterişli bir tür olan ve erkeklerinde boğaz tüylerinin macenta (fuşya) rengi olduğu geniş kuyruklu sinekkuşunu sınadılar.

Sinekkuşlarının rengârenk çiçeklerden beslenmeye yönelik doğal içgüdüsünden faydalanan Stoddard, onları çekmek için bir tetrakromatın görebileceği renkler oluşturacak şekilde tasarlanmış özel ışıkların yanına yerleştirdiği yemlikler kullandı.[47] Işıklardan biri, nektar bulunan yemliği yeşil ve ultraviyole karışımıyla, bir diğeriyse su bulunan yemliği saf yeşil ışıkla aydınlatıyordu. Stoddard için bu iki renk birbirinden farksızdı ama sinekkuşları azıcık deneyim kazanınca ikisini ayırt edebiliyorlardı. Gün boyunca, nektar yemliğine giderek daha fazla akın eden sinekkuşları "bize özdeş görünen ışıkları birbirinden ayırt etmeyi öğrendiler." Stoddard, "Biz de böyle olacağını tahmin ediyorduk ama kendi gözümüzle görmek olağanüstü heyecan vericiydi," diyor.*

Böyle deneylerle bile kuşların neyi ne kadar görebildiğini kestirmek zor. Onlarınki sadece insan görüşü artı ultraviyoleyi görmek ya da arı görüşü artı kırmızıyı görmek şeklinde düşünülemez. Tetrakromasi,

* Stoddard her iki ışığı da aynı renge ayarlayınca sinekkuşları nektar bulunan yemliğe her seferinde gelmekten vazgeçmişti. Bu gözlem, sinekkuşlarının yaptığı şeyin, doğru yemliğin yerini öğrenmekten ya da koku gibi başka duyulara güvenmekten ibaret olmadığını düşündürüyor.

görülebilir spektrumun sınırlarının genişletmekle kalmaz, yepyeni bir renk *boyutunun* kapısını açar. Unutmayın ki dikromatlar, trikromatların gördüğünün ancak yüzde 1'ini –milyonlarca renge karşı on binlerce renk– görebilir. Trikromatlarla tetrakromatlar arasında da aynı uçurum varsa kuşların ayırt edebildiği yüz milyonlarca rengin sadece yüzde 1'ini görebiliyor olabiliriz. İnsandaki trikromatik görüşü, köşeleri kırmızı, yeşil ve mavi konilerimizi temsil eden bir üçgen olarak düşünün.[48] Görebildiğimiz her renk, bu üçünün bir karışımıdır ve o üçgenin içindeki bir noktayla gösterilebilir. Kuşların görüşüyse dört köşesi dört koniyi temsil eden bir *piramit* olarak düşünülebilir. Bizim bütün renk alanımız bu piramidin sadece *bir yüzünü* oluştururken, iç hacmi çoğumuzun erişemediği renkleri temsil eder.

Kırmızı ve mavi konilerimiz birlikte uyarıldığında mor görürüz; mor, gökkuşağında bulunmayan ve tek bir dalgaboyuyla temsil edilemeyen bir renktir. Bu tür karışımlar spektral olmayan renkler olarak tanımlanır. Dört konili sinekkuşları bunun gibi *çok fazla* renk görür; UV-kırmızı, UV-yeşil, UV-sarı (kırmızı + yeşil + UV) ve muhtemelen UV-mor (kırmızı + mavi + UV) vb. Eşimin önerisi ve Stoddard'ın bundan duyduğu memnuniyet üzerine bu renkleri kmor, ymor, smor ve ultramor olarak adlandıracağım.* Stoddard, spektral olmayan bu renklerle çeşitli tonlarının, bitkilerdeki ve kuş tüylerindeki renklerin kabaca üçte birini oluşturduğunu buldu.[49] Bir kuş için kırlar ve ormanlar ymor ve smor harelidir. Geniş kuyruklu sinekkuşu için erkeğin boğazındaki parlak fuşya tüyler aslında ultramordur.

Tetrakromatların beyaz kavramı da farklıdır. Bütün konilerimiz eşit derecede uyarıldığında beyaz görürüz. Fakat insandaki koni üçlüsünden farklı olarak bir kuşun koni dörtlüsünü uyarmak için dalgaboylarının farklı bir karışımı gerekir. Kâğıt UV'yi soğuran boyalarla işlemden geçirildiğinden kuşa beyaz görünmez. Sözde "beyaz" olan kuş tüyleri de UV'yi yansıtır ve kuşlara her zaman beyaz görünmez.[50]

Stoddard, kuşların kmorları, ymorları ve spektral olmayan diğer renkleri nasıl yorumladığını anlamanın zor olduğunu söylüyor. Keman çalan biri olarak, aynı anda çalınan iki notanın seslerinin ayrı ayrı

* UV-mora, ultramor mu yoksa mosmor mu demek gerektiğine hâlâ karar veremedim.

duyulabileceğini ya da tamamen yeni tonlarda birleşebileceğini biliyor. Benzer şekilde, sinekkuşları kmoru kırmızıyla UV'nin karışımı olarak mı yoksa başlı başına yeni ve muhteşem bir renk olarak mı görür? Gidecekleri çiçekleri seçerken "kmoru kırmızılarla aynı kefeye mi koyarlar yoksa tamamen farklı bir ton olarak mı görürler?" diye soruyor Stoddard. Saf kırmızıdan farklı olduğunu anlayabilirler ama bu rengin "onlara nasıl göründüğünü tarif edemem," diye ekliyor.

Kuşlar dışında tetrakromat başka hayvanlar da var. Sürüngenler, böcekler ve mütevazı Japon balığı gibi tatlı su balıklarında da dört çeşit koni bulunur.[51] Modern hayvanlar arasındaki tetrakromatlara bakıp bunları geriye doğru izleyen biliminsanları, ilk omurgalıların da muhtemelen tetrakromat olduğu sonucuna varabilir.[52] Memelilerin hepsi başlangıçta muhtemelen gececil olduklarından, atalarındaki konilerden ikisini kaybederek dikromat hale geldiler. Fakat bu memeliler, tetrakromat olduğu neredeyse su götürmeyen ve Stoddard'ın ifadesiyle "muhtemelen spektral olmayan her türlü havalı rengi gören" dinozorların ayaklarının altında oradan oraya kaçışıyorlardı. İşin ilginç yanı, illüstratörler ve film yapımcıları dinozorları uzun zaman kahverengi, gri ve yeşilin donuk tonlarında canlandırmıştır. Ressamlar, kuşların ataları olduğunun ortaya çıkmasından esinlenerek daha yeni yeni bu hayvanları canlı renklerle betimlemeye başladılar. Fakat bir trikromatın gözüyle uygulanan bu canlı renkler bile dinozorların büründükleri ya da gördükleri renklerin çok küçük bir bölümünü oluşturur.

Çoğu insan için bir köpeğin renkleri nasıl algıladığını hayal etmek, bir kuşun (ya da dinozorun) renk algısını hayal etmekten çok daha kolaydır. Trikromatsanız, belli bazı renkleri ortadan kaldıran uygulamalar kullanarak dikromat görüşü taklit edebilirsiniz. Hatta farklı bir trikromatın (örneğin bir arının) görüşünü, onun mavi, yeşil ve UV sistemlerini bizim kırmızı, yeşil ve mavi sistemimizle eşleştirerek taklit edebilirsiniz. Ancak bir tetrakromatın gördüğü renkleri, trikromat bir göze göstermek mümkün değil. "Spektral olmayan bu renkleri görmemizi sağlayacak gözlükler yapılıp yapılamayacağını soruyorlar," diyor Stoddard. Spektrofotometre kullanarak bir kuşun tüylerindeki kmorları ve ymorları bulabilirsiniz ama sonrasında onları bizim daha sınırlı renk aralığımıza göre yeniden renklendirmeniz gerekir. Dört, üçe sığmaz.

Sinir bozucu olsa da çoğumuz birçok hayvanın birbirine gerçekte nasıl göründüğünü ya da renk algılarının ne denli çeşitli olabileceğini hayal edemiyoruz.

Kırmızı postacı kelebeğinin uçuş tarzı, bir kelebek için bile fazlasıyla zariftir. Hızlı hızlı kanat çırparak ama ileriye doğru şaşırtıcı derecede az hareket ederek, özellikle bir yerde olmamak için büyük çaba harcıyormuş gibi görünür. Ağır hareketleri, savunma stratejisine uygundur: Kırmızı, siyah ve sarı uyarı renkleriyle bezeli ve toksinlerle dolu bu kelebeğin yırtıcılardan sakınmak için acele etmesi gerekmez. Ama insana hiç de itici gelmez. Kaliforniya'nın Irvine şehrindeki bir serada, başımın üzerinde, ağaç minelerinin kırmızı-turuncu çiçekleri arasında uçuşan yirmi civarında kırmızı postacı kelebeğini seyrediyorum. Canlı renkleri ve yatıştırıcı hareketleri sayesinde dünya hem daha zengin hem de daha dingin görünüyor. Bilimsel adı *Heliconius erato* olan bu kelebek ismiyle müsemmadır. Yunan mitolojisinde Helikon Dağı, esin perilerinin yurdu ve şiirsel esinlenmenin kaynağıdır; Erato ise aşk şiirinin esin perisidir.

Kelebeklerden biri ağaç minesinin tomurcuğuna konuyor; karnını bükerek altın sarısı, minicik bir yumurta bırakıyor. Yakındaki bir yaprakta bir araya gelmiş beş kelebek kanatlarını yavaş yavaş açıp kapatıyor. Bir başkası, seranın sıcaklığını 36 santigrat derece ve nem oranını yüzde 59 olarak gösteren iklim kontrol sisteminin üstüne konmuş. Kot pantolon giymekle hata yaptığımı anlıyorum. Daha makul giyinmiş olan Adriana Briscoe yüzünde kocaman bir gülümsemeyle yanımda durmuş, etrafına bakıyor. Bu sera onun hem iş yeri hem de inziva alanı, mutlu olmak ve dinginleşmek için geldiği yer. "Burada olmayı seviyorum," diyor dalgın dalgın. "İnsan buradayken, birçok biliminsanının meslek hayatını niye bu kelebekleri araştırmaya adadığını anlıyor."

Kırmızı postacı kelebeği, Orta ve Güney Amerika'da, adını trajedinin esin perisinden alan, yakın akrabası *Heliconius melpomene,* yani postacı kelebeğiyle birlikte yaşar. Her iki tür de zehirlidir ve birbirlerini o kadar iyi taklit ederler ki birinden uzak durmayı öğrenen yırtıcılar

diğerinden de sakınır. Aynı yerde yaşayan iki tür neredeyse özdeş görünür.[53] Ama aynı tür, bölgeden bölgeye önemli değişkenlikler gösterirler. Örneğin Peru'nun Tarapoto şehrinde yaşayan her iki kelebek türünün de ön kanatlarında kırmızı, arka kanatlarında sarı bantlar vardır. Ama 130 kilometre uzaktaki Yurimaguas kasabasında, her iki türün de kanat tabanı kırmızı olan ön kanatlarında sarı lekeler, arka kanatlarındaysa kırmızı şeritler bulunur. Her iki bölgedeki *erato* türünün aslında aynı tür olduğuna inanmak ne kadar zorsa belli bir yerdeki *erato* ve *melpomenes* türlerini birbirinden ayırt etmek de o kadar zordur. Briscoe'nun serasındaki kelebekler her iki türden de olabilir, hangisinin hangisi olduğunu anlamam mümkün değil. Peki o zaman, kelebeklerin kendileri nasıl anlıyor? Briscoe, 1990'ların sonlarında bu kelebekler üzerinde çalışmaya başladığında, bu sorunun yanıtını kimsenin bilmediğini şaşkınlıkla fark etmiş. "Görselliğin bu denli önemli olduğu bu popüler hayvanların gözlerini incelemek gerektiği apaçıktı," diyor.

Kelebeklerin çoğu trikromattır. Arılar gibi onlar da en fazla UV'ye, maviye ve yeşile duyarlı üç çeşit opsin taşır ve kırmızıdan UV'ye uzanan aralıktaki renkleri görürler. Fakat Briscoe 2010'da *Heliconius* kelebeklerinin iki önemli konuda akrabalarından farklı olduğunu keşfetti.[54] Öncelikle bu kelebekler tetrakromattır. Olağan mavi ve yeşil opsinlerin yanı sıra, farklı dalgaboylarını azami düzeyde soğuran *iki* UV opsine sahiptirler. İkincisi, akraba kelebeklerin kanatlarında sarı pigmentli desenler bulunmasına karşılık *Heliconius,* UV ile sarının karışımından oluşan, spektral olmayan smoru kullanır. Bu iki özellik birbiriyle ilişkilidir. *Heliconius* türü, iki UV opsiniyle spektrumun UV kısmını daha ince derecelere ayırarak UV esaslı renklerin farklı tonları arasındaki nüansları ayırt edebilir. Ayrıca kanatlarındaki bu renklere göre, kendi türü ile taklitçi tür arasındaki farkı anlayabilir. Görünüşe göre tek UV opsini olan kuşlar bile kelebeklerin kullandığı smor tonuyla sarıyı birbirinden ayıramamaktadır.[55]

Bu durum erkek *erato* kelebekleri için de geçerlidir. Briscoe'nun öğrencisi Kyle McCulloch, 2016'da sadece dişi *erato* kelebeklerinin tetrakromat olduğunu keşfetti.[56] Erkeklerse trikromattır. İkinci UV opsin genini taşır ama her nedense baskılarlar. Sincap maymunlarında olduğu

gibi, dişi *erato* kelebeklerinin renk âlemi de erkeklerde bulunmayan bir boyut içerir.* Briscoe'nun serasında çiftleşmeye başlayan iki kelebeği seyrediyoruz. Karınları birleşiyor ama dişi, ayrılmalarına fırsat kalmadan havalanıyor. Üreme organlarıyla kısa süreliğine birbirine bağlı ama Umwelt'leri birbirinden sonsuza dek ayrılmış iki kelebek yekvücut olmuş uçuyor.

Erato kelebeği, tetrakromaside cinsiyete göre farklılık gösteren tek tür değil. *İnsanlar* da bu özelliğe sahiptir. İngiltere'nin Newcastle şehrinde, bilimsel literatürde cDa_{29} olarak kodlanmış bir kadın var.[57] Anonim kalmak istediğinden röportaj vermeyen cDa_{29}'un adı kamuya açıklanmıyor. Ancak bu kadınla kapsamlı bir çalışma yürüten psikolog Gabriele Jordan'a göre cDa_{29} sadece bir tetrakromatın geçebileceği testlerde çok başarılı. Jordan, Stoddard'ın sinekkuşları gibi onun da son derece benzer tonlar içinde belli bir yeşil tonunu "ağaçtaki bir kiraz gibi" seçebildiğini söylüyor. "Bizim için o yeşil de diğerleri gibi bir yeşil. Başkaları bakar, bakar, bakar ve neden sonra bir tahminde bulunabilir. Ama o, farklı olan yeşili milisaniyeler içinde bulabiliyor."

Tetrakromatlar genellikle kadındır çünkü uzun ve orta dalgaboylarına hassas opsin genlerinin her ikisi de X kromozomu üzerinde yer alır. Çoğu kadın iki X kromozomu taşıdığı için kalıtsal yolla genlerden her birinin birbirinden biraz farklı iki versiyonunu alabilir. Böylece farklı dalgaboylarına hassas *dört* opsin çeşidi ortaya çıkar (kısa, orta, uzun-a ve uzun-b gibi). Yaklaşık her sekiz kadından birinde bu örüntü görülür ama bu kadınların çoğu tetrakromat değildir.[58] Tetrakromat olabilmek için pek çok taşın yerli yerine oturması gerekir. Normalde kırmızı ve

* Bu hikâyenin başka bir ters köşesi daha var ki ilk kitabım *Mikrobiyota*'yı okumuş olanların hoşuna gidecek. Briscoe arada bir sadece üç opsini olan erkek benzeri gözlere sahip dişi *erato* kelebekleriyle karşılaşıyordu. Bu durum kafasını karıştırmıştı. Ta ki bu dişilerin *Wolbachia* denen bakteri tarafından enfekte edildiğini anlayana kadar. *Wolbachia* bu gezegendeki en başarılı bakterilerden biridir; böceklerin ve diğer eklembacaklıların büyük bölümünü enfekte eder. Sadece dişi soy hattında anneden kıza aktarılır ve işe yaramaz erkekleri ortadan kaldırmak için birçok numara çeker. Bazen erkekleri doğrudan öldürür. Bazen dişiye dönüştürür. Bazen de erkeklere gerek kalmadan dişilerin eşeysiz üremesini sağlar. *Erato* kelebeklerine ne yaptığıysa bilinmiyor ve Briscoe şimdilerde bunu anlamaya çalışıyor.

yeşil konilerin en güçlü tepki verdiği dalgaboyları arasında sadece 30 nanometrelik fark vardır. Yeni ve farklı bir renk boyutu kazanmak için dördüncü koninin bu aralığın tam ortasına, cDa_{29}'da olduğu gibi, yeşilden 12 nanometre uzağa oturması gerekir. Bu özelliğe tastamam uyan bir opsin oluşturmak için "genetik olarak neredeyse bir atomu bölmeniz gerek," diyor Jordan. Dahası, oluşan dördüncü koni doğru olsa bile retinanın doğru yerinde, renkli görmenin en keskin olduğu merkezî foveada bulunması gerekir. En önemlisi, bu konilerden gelen sinyallerde karşıtlık sürecini yaratabilmek için doğru nöral devrelerin kurulmuş olması gerekir.

Tüm bu özellikler o kadar nadiren bir araya gelir ki dört konisi olan kadınların pek azı gerçekten tetrakromattır. Jordan'ın söylediğine göre, tetrakromat olduğunu iddia edenlerin çoğu aslında öyle değil. Özellikle ressamlar, başkalarına kıyasla daha fazla renk gördüğüne inanır ama yaptığınız işten ötürü renkler konusunda daha dikkatli ve özenli olmanız, bambaşka bir renk boyutunu görebildiğiniz anlamına gelmez. "Sınadığım pek çok kişinin tetrakromat olmadığı ortaya çıktı," diyor Jordan. "Süperinsan gibi görme fikri çok çekici.* Ama iddia edildiği kadar yaygın bir özellik değil." Tetrakromat olduğu doğrulanmış ilk insan cDa_{29}'du; Jordan, Birleşik Krallık'ta yaklaşık 48.600 tetrakromat daha olduğunu tahmin ediyor ama bu kişileri bulmak kolay değil.† Dikromatların hayatı donuk renklerden ibaret olmadığı gibi tetrakromatlar da etrafta gösterişli ve cart renk kıyafetlerle gezmez. cDa_{29} testlerden geçene kadar "görme duyusu açısından özel biri olduğu hiç aklına gelmemişti," diyor Jordan. "Dünyayı kendi retinamız ve beynimizle görürüz ve bir başkasınınkiyle görmediğimiz sürece daha iyi olduğumuz aklımızın ucundan bile geçmez."

---

* Dikkat ederseniz, cDa_{29} ve diğer gerçek tetrakromatlar UV'yi kuşların görebildiği şekilde göremez; o nedenle bu insanların görüşü normal trikromatlarla aynı dalgaboyu aralığını kapsar. Yine de fazladan bir renk boyutu görebilirler ve renk alanları üçgen yerine piramitle temsil edilebilir. Ama bu piramidin kapsamı, kuşlarınkine sığar.

† Jordan 2019'da gerçek tetrakromasi özelliğini veren ve yeşil koniyle arasında tam 12-nanometre olan dördüncü koninin kadınlarda bulunup bulunmadığını saptayan hızlı bir test geliştirdi. "Bu test sayesinde hızlı bir tarama yapıp kaç kişi olduğunu anlayacaktık," diyor. "Ama sonra COVID-19 başladı."

Jordan bunu ilk söylediğinde biraz hayal kırıklığına uğradığımı itiraf etmeliyim. Jay Neitze, genetiği değiştirilmiş sincap maymunu Sam'in, hayatına yeni giren trikromasiyi umursamadığını söylediğinde de aynısını hissetmiştim. Renkler bizim için önemlidir. Renkli televizyon, renkli yazıcı ve kitaplara, siyah-beyaz olanlardan daha fazla kıymet veririz. Doğal olarak, görüşe yeni bir renk boyutu eklenmesinin muhteşem bir şey olmasını bekleriz. Bunun kanıksanabildiğini öğrenmek rengin sihrini soldurur. Ama elbette ister monokromat ya da dikromat ister trikromat veya tetrakromat olalım hepimiz gördüğümüz renkleri kanıksarız. Her birimiz kendi Umwelt'imize sıkışıp kalmışızdır. Giriş bölümünde yazdığım gibi, bu kitap üstünlükle değil çeşitlilikle ilgili. Renklerin en muhteşem yanı, kimilerinin daha fazla renk görebilmesi değil, olası gökkuşaklarının böylesine çeşitli olmasıdır.

Tetrakromat insanlar ve *erato* kelebekleri hakkında düşünürken, insanların bir zamanlar, tüm hayvanların bizimle aynı renk tayfını gördüğünü düşünmüş olmasının ne kadar abes olduğunu fark ediyorum. İnsanlar bile renkleri aynı şekilde görmüyor.* İnsanlarda çeşitli kısmi ve tam renk körlük biçimleri söz konusu. Bazılarımız tetrakromatız. Hayvanlar âleminin geri kalanına bakarsanız daha da büyük varyasyonlar görürsünüz. Renkli görme 6 bin sıçrayan örümcek, 18 bin kelebek ve 33 bin balık türünde büyük ölçüde değişkenlik gösterir.

Sadece zebra balığı larvasının gözü bile en az üç farklı biçimde renkli görür.[59] Balığın retinasının gökyüzüne bakan kısmı siyah-beyaz görür çünkü havadaki yırtıcıların siluetini seçmek için renklere ihtiyacı yoktur. Dümdüz ileri bakan kısımda hâkim olan UV dedektörleri lezzetli planktonu görmeye yardım eder. Ufku ve balığın altında kalan alanı tarayan kısımsa tetrakromattır. Bu yavru balıkların, bir yandan siyah-beyaz, öte yandan insanların görebildiğinden de fazla rengi görebilen gözleri her şeye sahiptir.

Kendi görüşünüzün üzerine bir Instagram filtresi ekleyerek başka bir hayvanın renkleri nasıl gördüğünü anlayamazsınız. Bu renklerin bir

* Amanda Melin, insanda renkli görmenin şempanzeler, babunlar ve diğer primatlara kıyasla çok daha çeşitli olduğunu söylüyor. Neden böyle olduğunu bilmiyoruz; belki de hayatta kalmamız, gördüğümüz renklere eskisi kadar bağlı olmadığı ve bir zamanlar zararlı olabilecek varyantların varlığını sürdürmesine izin verdiği içindir.

manzarada ya da bir mevsim boyunca veya her bireyde aynı kalacağını varsayamazsınız. Ayrıca bir hayvanın opsin ya da fotoreseptörlerinin sayısına göre görsel renk paletini yeniden oluşturamazsınız. Kentaro Arikawa, birçok kelebekte cidden aşırı sayıda fotoreseptör sınıfı olduğunu keşfetti.[60] Küçük beyazmelekte sekiz fotoreseptör sınıfı vardır ama bunlardan biri yalnızca dişilerde, bir diğeriyse yalnızca erkeklerde bulunur. Asya kırlangıçkuyruğunda [*Japanese yellow swallowtail*] altı fotoreseptör bulunur ama kelebek tetrakromat görüş için bunların sadece dördünü kullanır; diğer ikisi muhtemelen belli renkteki uçan nesneleri fark etmek gibi özel işlere yöneliktir. Bu açıdan kelebekler arasında şampiyon, *15* fotoreseptör sınıfıyla mavi kırlangıçkuyruktur. Fakat bu kelebek, 15 boyutlu renkli görme özelliği olan bir pentadekakromat değildir. Fotoreseptörlerin yalnızca üçü gözün her yerinde, dördü sadece üst, sekiziyse sadece alt yarısında bulunur. Arikawa, ararsa daha da ince ayrımlar bulabileceğini umuyor. *Graphium sarpedon*'un, diğer 11 fotoreseptör sınıfını görme alanının dar kısımlarındaki çok özel bazı şeyleri saptamak için kullanan bir tetrakromat olduğunu düşünüyor.

Nitekim renkli görmenin tetrakromasiden daha karmaşık olması gerekmez. Hayvanlar, doğal cisimlerden yansıyan renklere dayanarak, spektrum boyunca eşit aralıklarla konumlanmış dört fotoreseptör sınıfıyla görmeleri gereken her şeyi görebilirler. Kuşlardaki durum ideal düzenlemeye yakındır. Bunun ötesine geçen her şey israf ve verimsiz bir fazlalık olacaktır. O halde biliminsanları dört çeşitten çok daha fazla fotoreseptörü olan hayvanlar bulduğunda işin içinde bir iş var demektir.

"Parmaklarını içeri sokarsan vuracak sana," diyor Amy Streets, Avustralya'nın Brisbane şehrinde, yanında durduğumuz küçük akvaryum tankına işaret ederek. "Denemek istersen..."

İstemesine istiyorum da tanktaki hayvan bu konuda nam salmış ve ben de tedirginim.

"Ne kadar sert vuruyor?" diye soruyorum.

"Seni şaşırtmaya yetecek kadar," diyor Streets. "Denesene."

Serçeparmağımı suya batırıyorum. Anında yeşil bir ışık çakar gibi oluyor ve beş santimetre uzunluğunda bir hayvan sudan fırladığı gibi parmağıma saldırıyor. Güçlü bir tıklamayla birlikte parmağımda keskin

ama dayanılabilir bir acı hissediyorum. Mor benekli mantis karidesinden yumruk yediğim için garip bir şekilde gurur duyuyorum.

Stomatopodlar olarak da bilinen mantis karidesleri, denizlerde yaşayan kabuklulardır. Yengeçler ve büyük karidesler [*prawn*] ile akraba olmakla birlikte 400 milyon yıl önce farklı bir kola ayrılarak evrilmişlerdir. Hayvanın arka yarısı küçük bir ıstakoza benzer ama ön yarısında, ismini aldığı mantis (peygamberdevesi) gibi gövdesinin altında katlanmış iki kol bulunur. "Mızrakçı" türlerde bu kollar bir dizi amansız dikenle, "parçalayıcılar"daysa vurucu bir çekiçle sonlanır. Her iki grup da silahını akıl almaz bir hızla savurur ve bahaneye pek ihtiyaç duymaz. Attığı yumrukla avına boyun eğdirir. Yuvalarının üzerinde dolaşan her şeye yumruk atarlar. İlk karşılaşmada birbirlerine yumruk atarlar. İnsanların ortaya fikir atması gibi mantis karidesleri de sık sık, saldırganca ve kışkırtma olmaksızın yumruk atar.

Bunlar, yeryüzündeki en hızlı ve güçlü yumruklardır. Büyük bir "parçalayıcı"nın çekiç kolları, yüksek kalibreli bir mermi gibi ivme kazanıp *suyun içinde* saatte 80 kilometre hıza erişebilir.[61] Bu hayvanlar yumruklarıyla yengeç kabuklarını, akvaryumu, eti ve kemiği parçalayabilir. Onlara başparmak-ayırıcı, parmak-çıkarıcı, mafsal-kırıcı denmesi boşuna değil. Bu hayvanlardan birinin bana vurmasına izin vermek konusunda niye bu denli gerildiğimi anlamışsınızdır. O mantis karidesi bana zarar veremeyecek kadar küçük olmasına rağmen kolunun önündeki suyu püskürtecek kadar hızlı hareket etmişti. Duyduğum tıklama da o sırada oluşan küçük hava kabarcıklarının patlarken çıkardığı sesti. "Farklı türlerin attığı şaplak sesleri az çok farklıdır ki bu da bir nevi eğlenceli," diyor Streets.

Beni, şatafatlı karapaksı* kırmızı, mavi ve yeşil çizgili rengârenk bir tavus kuşu mantis karidesinin bulunduğu başka bir tanka götürüyor. Beş yüz stomatopod türü içinde en ünlüleri bu. Aynı zamanda en güçlüleri. "*Sakın* ha bunlara bulaşma," diyor Streets üzerine basa basa. Sözünü dinliyorum. Karidesin sabrını sınamak yerine gözlerine bakıyorum. Başının üstündeki hareketli birer sapın ucunda bulunan iki gözü, mavi

* Karapaks: Aralarında kabuklular, örümceğimsiler ile kaplumbağaların da bulunduğu birtakım hayvanlardaki dış iskeletin üst (sırt) kısmı. (*e.n.*)

folyoya sarılı pembe "muffin"lere benziyor. Soldaki göz bana, sağdaki Streets'e bakıyor. Bunlar, herhalde yeryüzündeki en tuhaf gözler ve renkleri başka hiçbir hayvanın görmediği biçimde görüyorlar. Şimdiye dek karşılaştığımız bütün canlılar içinde hayal edilmesi en zor Umwelt, mantis karidesininkidir. Streets'in çalıştığı laboratuvarın sorumlusu Justin Marshall, otuz yılı aşkın zamandır bunu yapmaya çalışıyor.

Marshall'ın annesi doğa tarihi illüstratörü, babası deniz biyoloğu ve Londra'daki Doğa Tarihi Müzesi balık koleksiyonunun küratörüydü. Marshall'ın çocukluğunu kumsallar ve teknelerle, zihnini ise renklere ve deniz yaşamına duyduğu sevgiyle doldurmuşlardı. Doktora danışmanı Mike Land (çalışmalarını geçen bölümde görmüştük), 1986'da çalışma alanı olarak örümcekler, kelebekler ya da stomatopodlardan birini seçmesini istediğinde Marshall'ın kararı belliydi. "Hemen mantis karideslerini seçtim," diyor Marshall, "çünkü tropiklerde yaşıyorlardı."

Marshall bir tavus kuşu stomatopodunun gözünü kesip inceleyerek işe başladı. Diğer kabuklular gibi bu hayvanlar da ışık toplayıcı birçok ayrı birimden oluşan petek gözlere sahiptir. Ama diğerlerinden farklı olarak bu hayvanların gözleri üç bölümlüdür ve her göz, dünyayı saran tropikal kuşak misali bir orta bantla ayrılmış iki yarımküreden oluşur. Marshall bu orta banda mikroskopla baktığında güzel bir sürprizle –kırmızı, sarı, turuncu, mor, pembe ve mavi damlalardan oluşmuş kaleydoskopik bir renk cümbüşüyle– karşılaştı.[62] O zamanlar kabukluların renk körü olduğu düşünülüyordu. Bu hayvanınsa öyle olmadığı açıktı. "Lamı gösterdiğimde Mike'ın ne dediğini kelimesi kelimesine hatırlıyorum: 'Oha! Yok artık! Çüş!'" diye anlatıyor Marshall. "İyi bir şey olsa gerek, diye düşünmüştüm."

Marshall'ın tahminine göre mantis karidesi bu renkli damlaları, tek bir fotoreseptör sınıfına ulaşan ışığı filtreden geçirmek için kullanıyordu. Bu sayede normalde renk körü bir gözle renkleri görebiliyordu. Bu fikri sınamak isteyen Marshall hem gerekli donanıma sahip hem de stomatopodlara ilgi duymaya başlamış Tom Cronin'le çalışmak üzere İngiltere'den ABD'ye gitti. Yoğun geçen birkaç hafta boyunca ikili yavaş yavaş ilerleme kaydederek bulabildikleri fotoreseptörleri analiz etti. Bir değil, en az *11* fotoreseptör sınıfı olduğunu görünce şok geçirdiler.[63] "Hiç mantıklı değildi," diyor Cronin. "Gözün neresine

baksak bir yenisini buluyorduk. Justin'le çalıştığımız ve bunu keşfettiğimiz o dönem, meslek hayatımın en olağanüstü zamanıydı." İkili 1989'da mantis karidesinin "daha önce tanımlanmış her şeyi geride bırakan bir renkli görme sistemine sahip olması mümkün," diye yazmıştı. Ya da Marshall'ın ifadesiyle "Daha da fazla *çüş* dedirtecek bir görme sistemine."

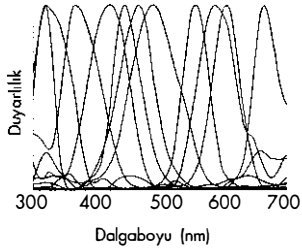
Orta bant, altı sıra ışık toplayıcı birim içerir.[64] Şimdilik alttaki iki sırayı unutun; renkli görmede yalnızca üstteki dört sıra kullanılır. Her sırada katmanlar halinde düzenlenmiş kendine özgü üç fotoreseptör bulunur. Birinci sırada menekşe rengi ve mavi reseptörler, ikinci sırada sarı ve turuncular, üçüncü sırada turuncu-kırmızı ve kırmızılar, dördüncü sırada siyan mavisi (camgöbeği) ile yeşil olanlar yer alır ve her sıradaki fotoreseptörlerin üstünde, o sıraya özgü bir UV reseptörü oturur.* Yani UV'ye özel fotoreseptörlerle beraber toplam *12* fotoreseptör sınıfı bulunur.† Mantis karideslerinde UV spektrumu kapsayan fotoreseptör sınıfı sayısı, bizdeki *toplam* fotoreseptör sınıfı sayısından fazladır.[65] Bu kadar çeşitli fotoreseptör ne için kullanıyor olabilirler? Mantis karidesi 12 boyutlu renkli görüş özelliğine sahip bir dodekakromat olabilir mi? Ya da orta banttaki her sırada dört çeşit trikromasi özelliği mi vardır? Öyle ya da böyle bu hayvan, birbirinden ayırt edilemeyecek kadar yakın tonlar arasındaki en küçük farklılıkları dahi seçebilen bir renk erbabı olmalı. Bir mercan resifi bize bile bu denli etkileyici göründüğüne göre kimbilir bir stomatopoda nasıl görünür? Bu konuda spekülasyonlar ortalığı karıştırmış, hayaller çılgınca boyutlara varmıştı. Çevrimiçi bir bant karikatür sayfası olan *The Oatmeal,* "Bizim gökkuşağı gördüğümüz yerde, mantis karidesi bir termonükleer ışık ve güzellik bombası görür," yorumunu yapmıştı.[66]

---

* Marshall'ın fark ettiği renkli damlalar 2 ve 3. sırada yer alır.. Onun da tahmin ettiği gibi, bu damlalar filtre görevi görür ama işlevleri alttaki fotoreseptörlerin duyarlılığını artırmaktır.

† Bu hayvanlarda 16 fotoreseptör sınıfı bulunduğunu okumuş olabilirsiniz. Orta bandın ilk dört sırasındaki 12 fotoreseptör sınıfının yanı sıra son iki sırada ve yarımkürelerde ikişer sınıf daha bulunur. Bildiğimiz kadarıyla bu dördü renkli görmede rol oynamaz. Ayrıca bütün mantis karideslerinde 12 sınıf yoktur. Çoğu tür rengârenk sığ sularda yaşar; buna karşılık daha derin sularda yaşayan bazı türler, bir ikisi hariç bütün fotoreseptörlerini kaybetmiştir.

Ama işin aslı farklı. Marshall'ın öğrencisi Hanne Thoen 2014'te, mantis karidesinin giderek güçlenen itibarını sarsan bir deney yaptı.[67] Onlara, ödül olarak yiyecek vererek, farklı renklerdeki iki ışıktan birine saldırmayı öğretti. Ardından renkleri, hayvanların artık birbirinden ayıramayacakları kadar benzer hale gelene dek değiştirdi. İnsanlar, aralarında 1-4 nanometre fark olan dalgaboylarını birbirinden ayırabilirler. Fakat mantis karidesi, kabaca saf sarı ile turuncu arasındakine benzer 12-25 nanometrelik farklılıklarda çuvallamıştı. Bütün optik aşırılığına rağmen renkleri ayırt etme becerisinin berbat durumda olduğu anlaşıldı. İnsanlar, arılar, kelebekler ve Japon balıkları mantis karidesinden daha iyi performans gösterir.



Her eğri, mantis karidesinin gözündeki 12 fotoreseptör sınıfından birini temsil eder. Eğrinin zirvesi, o fotoreseptör sınıfının en duyarlı olduğu dalgaboyunu gösterir.

Marshall artık mantis karidesinin renkleri kendine özgü bir biçimde gördüğünü düşünüyor. Karidesin gözü, milyonlarca ton arasında ayrım yapmak yerine aslında tam tersine spektrumdaki çeşitli renkleri, çocukların boyama kitaplarındaki gibi 12 renge daraltır. Her çeşit kırmızı 3. sıranın en alttaki fotoreseptörünü uyarır. Bütün menekşe tonları 1. sıranın en üstteki reseptörünü uyarır. Retina, bu 12 reseptörün çıktılarını karşıtlık süreciyle kıyaslamak yerine ham sinyalleri doğrudan beyne gönderir. Daha sonra beyin bu örüntüleri kullanarak belli renkleri tanır; bu işleyişte görünür ışık spektrumu barkod, orta bantsa süpermarket kasasındaki tarayıcı gibi davranır. Eğer 1, 6, 7 ve 11 numaralı reseptörler devreye girerse, beynin bu sinyalleri av olarak algılayacağını ve mantis karidesinin saldıracağını düşünebilirsiniz. Eğer 3, 4, 8 ve 9 numaralı

reseptörler ateşlenirse bu, eşleşebileceği bir mantis karidesi olabilir çünkü Marshall'ın söylediğine göre hayvan "çok dikkatli biçimde kur yapmaya başlar." Mantis karidesinin renk kavramı olmayabilir bile.

Tüm bunlar, eldeki bilgiye dayalı bir tahminden ibaret. Konuştuğum stomatopod araştırmacıları arasında, bu hayvanların ne gördüğünü gerçekten bildiğini iddia eden çıkmadı. Farklı işler için farklı renkli görme biçimleri kullanıyor olmaları mümkün. Besini tanımak için Thoen'ın deneyinde olduğu gibi 12 renkli bir başvuru çizelgesi yeterli gelebilir. Fakat birbirlerini tanımak için benzer renkler arasında ayrım yapabilmelerini sağlayan daha konvansiyonel bir sistem kullanıyor olabilirler. Ne de olsa birçoğu canlı renklere sahiptir ve karşılaştıklarında birbirlerine bu işaretleri sergiler. "Eş bulmada nüanslar önemli olabilir," diyor Cronin. "Ama bunu deneyle göstermek çok zor."

Hayvan davranışlarıyla ilgili çalışmalar her zaman zordur. Ama mantis karidesinin davranışı üzerinde çalışmak mazoşizm sınırlarına varıyor. Streets, Marshall'ın laboratuvarında, yeni bir deneyin parçası olarak tavus kuşu stomatopodlarını, üzerinde belli renkler olan kablo bağlarına saldırmaları için eğitmeye çalışıyor. Fakat nasıl olduğunu bana göstermek istediğinde hayvanlar ısrarla yanlış kablo bağını seçiyor. Derken içlerinden biri akvaryumun duvarına yumruk atıyor. Bir başkası belli bir şeye hedef almadan havaya (ya da suya?) yumruk sallıyor. Streets'e, bu hayvanları eğitmenin zor olup olmadığını soruyorum. "Aman tanrım," diyor başını yavaşça sallayarak. Çok sık yemeleri gerekmediğinden yiyecekle motive olmuyorlar. Görünüşe göre ilgilerini çok çabuk kaybediyorlar; o yüzden Streets günde sadece bir test yapabiliyor. "Yemin ederim, ne yapmaları gerektiğini biliyorlar ama o kadar hainler ki," diyor Streets.

"Onlarla çalışmayı seviyor musun yoksa bundan nefret mi ediyorsun?" diye soruyorum.

"İkisi de," diyor boyun eğmiş bir ifadeyle. "Başlangıçta müthiş geliyor. *Mantis karidesleriyle* çalışıyorum! Böyle şeyleri seven herkes bu hayvanların adını duymuştur. Ama sonra onlarla çalışmaya başlıyorsun ve orada öylece oturup kendi kendine bunu niye yaptığını soruyorsun."

***

Biz de Streets gibi, mantis karidesleriyle biraz daha zaman geçireceğiz çünkü bu hayvanların gözlerinde, görünenden çok daha fazlası var. Gerçekten de gözleri o kadar sıradışı, o kadar karmaşık ve zor anlaşılır ki bugün birçok biliminsanı onlar üzerinde çalışıyor. Nicholas Roberts ve Martin How, çalışmalarını İngiltere'nin Bristol şehrinde sürdürüyorlar. Beni tavus kuşu mantis karideslerinin de bulunduğu bir odaya götürüyorlar; karideslerin her biri kendi güvenlikleri için ayrı akvaryumlarda yaşıyor. Tankları göz hizasında olduğu için bu hayvanların ne kadar meraklı olduğunu kolayca anlayabiliyoruz. Birkaçı yaklaştığımızı fark edip bize bakıyor. Tanklardan birinin camına parmağımı bastırıyorum; Nigel adlı stomatopod yüzerek bize doğru geliyor. Parmağımı hareket ettiriyorum, Nigel da sanki onu sürüklüyormuşum gibi parmağımı takip ediyor.

Nigel'ın gözleri fıldır fıldır; yukarı aşağı, sağa sola gidip geliyor; bazen saat yönünde, bazen saat yönünün tersine dönüyor.[68*] Nadiren birlikte ya da aynı yönde hareket ediyorlar. Robert yaptığı deneylerde bazen mantis karideslerini bir ekrana baktıkları sırada yukarıdan filme çekiyor. "Çoğu zaman gözlerinden biri kendi işini yaparken diğeri kameraya dönük oluyor," diyor Roberts. Önceki bölümde söylediğim gibi, aktif gözleri genellikle aktif bir zihnin işareti olarak yorumlarız. Ancak mantis karideslerinin beyinleri aslında küçük ve zayıftır. Aşırı hareketli gözleri araştırmacı bir zekânın belirtisi değil ama neyi nasıl gördüklerini anlamanın anahtarıdır.

Retinamızda görüşümüzün en keskin ve en renkli olduğu fovea bölgesi konilerden yana zengindir. Gözlerimizi oradan oraya kaydırarak, bu bölgeyle dünyanın farklı kısımlarına nişan alırız. Çevresel görüş alanımızda kalan ilginç bir şey fark edince bakışımızı çevirip renklerini ayrıntılı analiz ederiz. Mantis karidesleri de benzer bir şey yapar.[69] Orta bant renkleri görür ama görüş alanı incecik bir şeritle sınırlıdır. Yarımküreler muhtemelen sadece siyah-beyaz ama panoramik görür.

* Bizdeki derinlik algısı iki gözümüzden gelen görüntülerin karşılaştırılmasına bağlıdır sağlanır; halbuki mantis karidesi bu karşılaştırmayı bir gözünün üç bölgesiyle yapar. Her göz trinoküler görüş özelliğine sahiptir ve diğer gözden bağımsız olarak mesafe ölçebilir. Bu beceri, kavga sırasında çoğu zaman gözlerinden birini kaybeden dövüşken bir hayvanın çok işine yarar.

Mantis karidesi gözlerini etrafta gezdirirken yarımkürelerle hareketi ve ilgisini çekecek nesneleri arar. Bir şey dikkatini çekince bakışlarını ona kaydırır ve süpermarkette iki barkod okuyucusuyla raftaki ürünleri tarıyormuş gibi orta bantlarla alanı tarar.[70] Monokrom görmeyle başlayıp renkleri kademeli olarak mı ekler? "Öyle olduğunu sanmıyorum," diyor Marshall. Beyinlerinde "rengin somut, iki boyutlu bir temsilinin hiç oluşturmadığı"nı tahmin ediyor. Onun yerine, orta bantlarla çevreyi tararken, doğru fotoreseptör kombinasyonunu harekete geçirecek bir şeyin ortaya çıkmasını beklediklerini düşünüyor.

Bir mantis karidesi olduğunuzu hayal edin. Cümle âlem yumruk atacak bir şey aradığınızı biliyor. Gözleriniz durmadan, eşgüdümsüz olarak hareket halinde; sağ gözünüz resifin bir bölümünü incelerken sol gözünüz başka bir yere bakıyor. Monokrom görüyorsunuz, çünkü rengin değil hareketin peşindesiniz. Sağınızda bir şey fark ediyor, iki gözünüzü de o tarafa kaydırıyorsunuz. Şimdi ikisi birlikte, orta bantları gizemli nesnenin üzerinde gezdirerek ortamı tarıyor. Aniden 3, 6, 10 ve 11 numaralı fotoreseptörler ateşleniyor. Beyniniz onun bir balık olduğunu algılıyor. Kollarınız ileri doğru fırlıyor ve hedefi vuruyor.

Bir hayli verimli olan bu görme tarzı, mantis karidesinin küçük beyni için daha az iş anlamına gelir* ama bir sorunu da beraberinde getirir. Hareketi, hareket eden bir gözle saptamak çok zordur. Caddede yürürken ya da bir aracın penceresinden dışarı bakarken gözlerimiz aslında ileride belli noktalara sabitlenerek birinden diğerine hızla kayar. Gözün bu seğirmeleri en hızlı hareketlerimizdendir; iyi ki de öyledir çünkü bu hareketler sırasında görme sistemi iptal olur. Beynimiz milisaniyelik boşlukları doldurarak kesintisiz bir görüş hissi verse de aslında bu bir yanılsamadır. Orta bantla yavaş tarama yapan mantis karideslerinde de aynısı olur. "O zaman harekete hassas görüşü iptal etmeleri gerekebilir," diyor How. "Göz hareket ederken dünya bulanıklaşır ve yaklaşan

* Mahallenizdeki lokantaya gizlice girip size bir hamburger getirecek bir robot yapmaya çalıştığınızı düşünün. Bu robotu, teknoloji harikası iki kamera ve bu kameralardan gelen görüntüleri analiz edip sınıflandırmayı öğrenebilen bir algoritmayla donatabilirsiniz. Ama "Sadece bir hamburger dedektörü yapmak elbette daha iyi olur," diyor Marshall. "Ve bunu yapmanın en iyi yolu, bir sıra-tarama cihazı imal etmektir. Böylesi çok daha verimlidir."

bir yırtıcıyı görmek muhtemelen zorlaşır." Ama göz tarama modunda *değilken* mantis karidesi çoğunlukla siyah-beyaz görür. Önceki bölümde gördüğümüz sıçrayan örümceklerde hareketi ve renkli detayları saptama gibi farklı görsel görevler ayrı gözler tarafından yürütülür. Mantis karidesiyse bunun için aynı gözün farklı bölümlerini *farklı zamanlarda* kullanır. Hareket görmek için renkten, renk görmek içinse hareketten vazgeçmesi gerekir. "Zaman paylaşımı yapan bir sistem," diyor Cronin. "Bizim yapabileceğimiz bir şey değil aslında ama onlar keşfetmiş ve işe de yaramış."

Fotoreseptörler, orta bantlar, yarımküreler ve mantis karideslerinin gözlerindeki diğer tüm abes karmaşıklıklar hakkında onca bilgiden bunalmış olabilirsin sevgili okur. Ya da bütün bunlardan sonra, stomatopod Umwelt'ini hayal edebilmenin eşiğine gelmişçesine her şey biraz daha netlik kazanmış olabilir. Öyle ya da böyle haberler kötü: *Dahası da var.*

Unutmayın ki ışık bir dalgadır. Hareket ederken salınım yapar. Bu salınımlar genellikle ışığın ilerlediği hatta dik olarak herhangi bir yönde gerçekleşebilir ama bazen tek bir düzlemle sınırlı kalır; bir ipi duvara tutturduktan sonra yukarı aşağı ya da iki yana doğru salladığınızda olduğu gibi. Böyle salınım yapan ve *polarize* ışık olarak adlandırılan bu ışık türü doğada yaygındır. Işığın su ya da hava tarafından saçılıma uğraması veya cam, mumsu tabakayla kaplı yapraklar yahut su kütleleri gibi pürüzsüz yüzeylerden yansıması sonucu oluşur. İnsanlar polarizasyondan büyük ölçüde habersizdir ama böceklerin, kabukluların ve kafadanbacaklıların çoğu, renkleri gördüğü gibi polarize ışığı görebilir.[71] Bu hayvanların gözlerinde yatay ve dikey polarize ışığın uyardığı iki fotoreseptör sınıfı bulunur. Bu iki reseptörü karşılaştırarak farklı düzeylerde ya da açılarda polarize olan ışığı ayırt edebilirler. Bu hayvanlara *dipolatlar* diyebiliriz.*

* Kafadanbacaklılar polarizasyona diğer bütün hayvanlardan daha duyarlıdır.[72] Shelby Temple ve meslektaşları bir mürekkepbalığı türü olan *Sepia plangon*'un (mourning cuttlefish), titreşim düzlemleri arasında sadece bir derecelik fark olan iki çeşit polarize ışığı birbirinden ayırt edebildiğini gösterdiler. Bu hayvanlar renk körüdür ama görsel dünyalarını ayrıntılarla zenginleştirmek için renk yerine polarizasyondan faydalanıyor olabilirler.

Mantis karideslerinde, gözlerin üst yarımküreleri bu şekilde düzenlenmiştir. Fakat alt yarımkürede polarizasyon reseptörleri 45 derecelik dönüş yapar. Orta bandın 5. ve 6. sıralarındaki reseptörler benzersiz bir özellik gösterirler. Polarize ışık genellikle tek bir sabit düzlemde salınım yapar ama bu düzlem bazen dönebilir ve böylece ışık bir sarmal boyunca hareket eder. Buna *dairesel polarizasyon* denir. Marshall'la çalışan doktora sonrası araştırma görevlisi Tsyr-Huei Chiou, 2008'de mantis karideslerinin dairesel polarize ışığı görebilen yegâne hayvan olduğunu keşfetti.[73] Mantis karidesinin orta bandının alt sırasında, saat yönünde ya da tersi yönde sarmal çizen dairesel polarize ışığa ayarlı fotoreseptörler bulunur. Dolayısıyla mantis karidesleri altı çeşit polarizasyon reseptörüne sahiptir: dikey ve yatay, iki diyagonal, saat yönünde ve tersi yönde. Bu istisnai hayvanlar *heksapolattır*.*

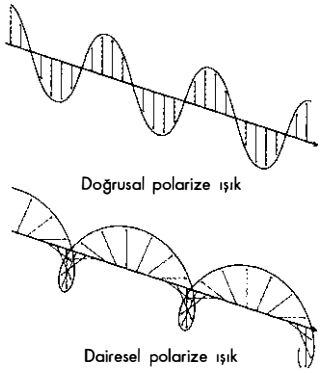
Polarizasyonu ve rengi ayrı ayrı açıkladım; bu başlıklar ders kitaplarında genellikle ayrı bölümler halinde anlatılır. Fakat mantis karideslerinin renge ve polarizasyona farklı yaklaştığını düşünmemiz için bir neden yok. Altı çeşit polarizasyon sinyalini, sanki başka renklermiş – etraflarındaki nesneleri tanımak için kullandıkları başka enformasyon kanallarıymış– gibi algılıyor olabilirler. Peki ama zaten 12 çeşit reseptöre sahipken altı çeşide daha ne gerek var? Bu hayvanların görmesi niye böylesine abartılı derecede karmaşık? "Resiflerde çok etkili işleyen, çok daha basit görme sistemlerine sahip hayvanlar yaşar," diyor Tom Cronin. O yüzden mantis karideslerinde "geriye şunu sormak kalıyor: *Bütün bunlar ne için?* Ve yanıtı kimse bilmiyor."

Bir dakika. Biraz geri gidelim. *Mantis karidesleri tam olarak neden dairesel polarize ışığı görebilir?*

Doğrusal polarize ışıktan farklı olarak dairesel polarize ışık çok nadirdir. Muhtemelen bu yüzden başka hiçbir hayvan onu görecek şekilde evrilmedi. Nitekim mantis karideslerinin ortamında dairesel polarize ışık yaydığını bildiğimiz tek şey, mantis karideslerinin kendisidir. Türlerden biri ışığı, erkeklerin kur yapmak için kullandığı, kuyruktaki

* Ayrıca mantis karidesi, bir nesneyle arkaplanı arasındaki polarizasyon kontrastını güçlendirmek için gözlerini çevirebilir.[74] Yani dinamik polarizasyon görüşüne sahip olduğunu bildiğimiz ilk hayvandır.

büyük salmadan; bir başkası, dövüş esnasında vücudunun rakiplerine sergilediği bazı kısımlarından yansıtır.[75] Belki de mantis karidesleri, yalnızca kendilerinin görebileceği kadar gizli bir ışık biçimi kullanarak iletişim kuruyorlardır. Fakat bu açıklamanın tatminkâr olmayan, dolambaçlı bir tarafı var. Eğer mantis karideslerinin gözleri onları görebilecek nitelikte olmasaydı dairesel polarize sinyaller bir işe yaramazdı. Peki ama ortada görebilecekleri bir şey yokken bu gözlerde niye bu beceri gelişti? Hangisi daha önce ortaya çıktı? Göz mü yoksa sinyal mi?



Tom Cronin, yanıtın göz olduğunu düşünüyor.[76] Orta bandın alttaki iki sırasında yer alan fotoreseptörler, dairesel polarize ışığı doğrusal polarize ışığa çevirecek şekilde düzenlenmiştir. Böylece mantis karidesleri dairesel polarize ışığı algılayabilir. Bu düzenleme anatomik bir tesadüf, etrafta pek az olmasına rağmen dairesel polarize ışığı görebilmelerini sağlayan petek gözün kazandırdığı tuhaf bir özellik olabilir. Mantis karideslerinin atalarında bu duyu aslında tesadüfen ortaya çıktı. Zamanla kabukları üzerinde dairesel polarize ışığı yansıtan yapılar ve gözlerine uygun sinyaller geliştirerek bu duyudan faydalandılar. Bu çok sık olur. Sinyaller görülmek içindir; o nedenle kürkleri, pulları, tüyleri ve dış iskeletleri süsleyen renkler, gözlerin algılayabileceği renkler tarafından biçimlendirilir. Gözler, doğanın tablolarına bakarken paletini belirler.

Örneğin primatlarda trikromasi taze filizleri ve olgun meyveleri daha iyi görmek için evrildi. Ve primatlar kırmızıyı Umwelt'lerine ekledikten sonra ciltlerindeki çıplak bölgelerin bir kısmı, kanın hücum etmesiyle kızararak mesajlar iletebilecek şekilde evrildi. Rhesus makaklarının kırmızı

suratları, mandrillerin kırmızı kıçları ve uakarilerin komik, kırmızı, kel kafaları hep trikromat görüşün mümkün kıldığı cinsel sinyallerdir.[77]

Mercan resiflerindeki balıkların da çoğu trikromattır. Ancak su kırmızı ışığı kuvvetle soğurduğundan, bu balıkların duyarlılığı spektrumun mavi ucuna kaymıştır. Bu kayma, Pixar'ın *Kayıp Balık Dori* animasyonundaki mavi cerrahbalığı gibi resif balıklarının neden çoğunlukla mavi ve sarı olduğunu açıklar. Onların trikromasi versiyonunda sarı, mercanların hâkim olduğu fonda, maviyse suyun içinde dikkat çekmez. Bu balıkların renkleri dalış yapan insanlara inanılmaz derecede dikkat çekici görünür çünkü bizim üçlü konilerimiz, mavileri ve sarıları ayırt etmekte ustadır ama balıkların kendisi birbirlerine ve yırtıcılara karşı güzelce kamufle olur.[78]

Yırtıcıların renkli görme özelliği, Orta Amerika'da yaşayan çilek zehirli ok kurbağasının örüntülerini çeşitlendirmiştir. Aynı türün birbirinden inanılmaz derecede farklı 15 çeşidi bulunur. Birinin bacakları camgöbeği, gövdesi misket limonu yeşilidir. Bir başkası siyah benekli ve turuncudur. Bu renkler o kadar çeşitlidir ki neredeyse rasgele oluşmuş gibi görünür ama bu görsel çılgınlığın iyi bir gerekçesi vardır. Bu kurbağalar zehirlidir ve en zehirlileri, en dikkat çekici olanlardır. Fakat Molly Cummings ve Martine Maan, kurbağaların sadece kuşlara bu denli dikkat çekici göründüğünü, yılanlar gibi diğer yırtıcılar içinse öyle olmadığını keşfettiler.[79] Amfibi derilerinin egzotik evrimini muhtemelen kuşların tetrakromat görüşü yönlendirdi. Bu sav mantıklı çünkü renkler ikaz edicidir ve peşlerindeki yırtıcıların görüşüyle en uyumlu renklere sahip kurbağaların saldırıya uğramamış olma ihtimali daha fazladır. Ayrıca Cummings ve Maan, bu yırtıcıların yani kuşların kim olduklarını, avladıkları kurbağaların renklerine bakarak çıkarabileceğimizi gösterdiler. Doğanın paletini gözler tanımladığına göre, bir hayvanın paleti bize onu yakalamaya çalışan gözlerin kime ait olduğunu söyler.

Aynı mantık çiçekler için de geçerlidir. 1992'de Lars Chittka ile Randolf Menzel, 180 çiçeği analiz ettiler ve çiçeklerin renklerini hangi gözün en iyi ayırt ettiğini çözdüler: Arılarda ve diğer birçok böcekte bulunan yeşil, mavi ve UV trikromasisi olan göz.[80] Bu polen taşıyıcılarda, çiçekleri iyi gören gözler geliştiğini düşünebilirsiniz ama öyle olmadı. Bu hayvanların trikromasi tarzı, çiçeklerin ortaya çıkmasından yüz

milyonlarca yıl önce evrildi.[81] O nedenle ikincisi, ilkine uyacak şekilde evrim geçirmiş olmalı. Çiçeklerde, ideal olarak böceklerin dikkatini çekecek renkler gelişmişti.

Algılama eyleminin kendisi hakkında farklı düşünmemi sağlayan bu bağlantıları önemli buluyorum. Algılama sanki pasif bir eylemmiş, gözler ve diğer duyu organları, ortamdaki uyaranları soğuran ve içeri alan vanalarmış gibi gelse de o basit görme eylemi zaman içinde dünyayı yeniden renklendirir. Gözler, evrimin kılavuzluğunda iş gören canlı resim fırçalarıdır. Çiçekler, kurbağalar, balıklar, kuş tüyleri ve meyveler, hepsi bize görmenin görüleni etkilediğini, doğada güzel bulduğumuz çoğu şeyin, hayvan dostlarımızın görüşüyle biçimlenmiş olduğunu gösterir. Güzellik, yalnızca bakanın gözünde değildir. Göz yüzünden ortaya çıkar.

2021 Mart'ında güneşli bir öğle sonrası, köpeğim Typo'yu yürüyüşe çıkarıyorum. Arabasını hortumla yıkayan komşumuza yaklaşırken Typo duruyor ve oturup dikkatle bakıyor. Onunla beklerken, hortumdan kavislenerek çıkan suda oluşan gökkuşağı dikkatimi çekiyor. Typo'nun gözünde bu gökkuşağındaki renkler sarıdan beyaza ve maviye uzanıyor. Benim gözlerim kırmızıdan menekşeye uzanan, arada turuncu, sarı, yeşil ve mavinin bulunduğu renkler görüyor. Arkamızdaki ağaca tünemiş serçelerle sığırcıklar ise belki daha da fazla renk tonunun bulunduğu, kırmızıdan ultraviyoleye uzanan bir yelpaze görüyor.

Bu bölümün başında, rengin temelde öznel olduğuna dikkat çekmiştim. Retinamızdaki fotoreseptörler ışığın farklı dalgaboylarını saptar, beynimiz bu sinyalleri kullanarak bir renk algısı oluşturur. İlk süreci incelemek kolay, ancak ikincisini incelemek son derece zordur. Sinyalleri alma ve algılama ya da hayvanların saptadıklarıyla gerçekte yaşadıkları deneyim arasındaki bu gerilim duyuların çoğu için geçerlidir. Bir mantis karidesinin gözünü kesip inceleyebilir, her bileşenin işlevini çözebiliriz; buna rağmen hayvanın nasıl gördüğünü gerçekten bilemeyiz. Bir elmanın üzerine konan sineğin ayaklarındaki tat reseptörlerinin şeklini tam olarak çıkarabilsek de yaşadığı deneyimi asla anlayamayız. Bir hayvanın duyumsadığı şeylere verdiği tepkilerin dökümünü çıkarabiliriz ama o hayvanın neler *hissettiğini* bilmemiz çok daha zordur. Hele hele konu ağrı olduğunda, bu ayrımı yapmak daha da zor ve önemli hale gelir.

4.

İstenmeyen Duyu

Ağrı

Havası tatlı tatlı mısır kokan sıcak bir odada eldivenli elimde küçük bir kemirgen tutuyorum. Hemen hemen kılsız bu pembe hayvan, bir sıçanı ya da kobayı andırıyorsa da daha çok suyun içinde fazla uzun kalmış bir parmağa benziyor. Tam gelişmiş bir ergin olmasına rağmen neredeyse bir embriyo gibi görünüyor. Gözleri siyah birer iğne deliği gibi. Uzun kesici dişleri dudaklarından öne doğru uzanıyor. Gevşek ama kaba öylesine yarı saydam ki iç organlarını, hatta karaciğerinin koyu renkli hatlarını seçebiliyorum. Bu, bir çıplak kör fare ve görünüşü, bu hayvanın en az garip olan yanı.*

Kemirgenler arasında istisnai derecede uzun yaşayan çıplak kör fareler ortalama ömrü 33 yıla varır.[2] Bu hayvanlar alt kesici dişlerini açıp kapatarak nesneleri kavrayabilir.[3] Spermleri biçimsiz ve uyuşuktur.[4] Hiçbir farenin bir dakikadan uzun dayanamayacağı oksijensizliğe 18 dakika dayanabilirler.[5] Karıncalar ve termitler gibi, bir ya da daha fazla kraliçe ve onlarca kısır işçiden oluşan, işbirliğine dayalı koloniler halinde yaşarlar. Elimdeki gibi yalnız bir çıplak kör fareye pek rastlanmaz. Keza açık alanda bir çıplak kör fareye de. Bu hayvanlar normalde

* Çıplak kör fareler o kadar garip hayvanlardır ki tuhaf özellikleri çoğu zaman efsaneleştirilmiştir ve haklarındaki iddiaların çoğu asılsızdır. Bu efsanelerin bir kısmını düzeltmek açısından önemli olan "Surprisingly Long Survival of Premature Conclusions About Naked Mole-Rat Biology" [Çıplak Kör Fare Biyolojisi Hakkında Erken Varılan Sonuçların Şaşırtıcı Derecede Uzun Olan Ömrü] başlıklı makaleyi hararetle tavsiye ederim.[1]

sürekli genişletip yeniden biçimlendirdikleri ve besleyici yumru kökler arayarak devriye gezdikleri labirent gibi yeraltı tünellerinde yaşarlar. Thomas Park, Şikago'daki laboratuvarında, tuvalet kâğıdı ruloları ve yongayla dolu, birbiriyle bağlantılı plastik kafesler kullanarak bu ağın bir benzerini oluşturmuş. Hayvanların bir kısmı, yapay tünellerini genişletmek için içgüdüsel olarak duvarları çiğniyor, gevşeyen toprağı iteliyormuşçasına arka ayaklarıyla tepiyor. Diğerleriyse yuva odasında, kraliçenin etrafına kıvrılmış buruşuk bedenlerden oluşan bir öbek halinde dinlenmeye çekilmiş. Kraliçe diğerlerine göre çok daha iri ve henüz doğmamış yavrularla dolu karnı şişkin görünüyor. "Çıplak kör fare ahalisi için güzel bir manzara," diyor Park. Öyle diyorsa öyledir.

Çıplak kör fareler, doğadaki yuvalarında da birbirlerini ısıtmak için büyük öbekler halinde uyur. En alttakilerin oksijeni çabucak tükenir ki muhtemelen bu yüzden oksijensizliğe dayanabilecek şekilde evrilmişlerdir. Ayrıca her nefes vermeyle yeraltındaki odacıklarda giderek artan karbondioksite tahammül etmek zorunda kalmışlardır.[6] Normalde ortalama bir odadaki havanın yüzde 0,03'ü karbondioksitten oluşur. Bu oran yüzde 3'e çıkarsa daha hızlı ve derin nefes alıp vermeye başlar, paniğe kapılırsınız. Bu sırada gaz, müköz zarların nemli yüzeyinde çözünerek bu yüzeyleri asitleştirir. Gözleriniz batmaya, burnunuz yanmaya başlar. Acıyla yüzünüzü buruşturursunuz. Kaçmaya çalışırsınız. Fakat bir çıplak kör fare ne kaçar ne de kılını kıpırdatır.

Park, bir ucundan karbondioksit diğer ucundan normal hava verdiği bir ortam kullanarak bunun doğru olduğunu gösterdi.[7] Böyle bir ortamda bir fare hemen ikinci bölgeye koşar. Fakat çıplak kör fareler, karbondioksitin yoğun olduğu yerde hallerinden memnun görünüyorlardı; karbondioksit seviyesi ancak akıl almaz derecede yükselip yüzde 10'a ulaştıktan sonra uzaklaşmışlardı. Asit bu hayvanların canını yakmaz. Keskin sirke kokan buharları solurken hiçbir rahatsızlık belirtisi göstermezler.[8] Eldeki bir kesiğe limon sıkmaktan farksız olduğu halde, deri altındaki asit damlalarını hissetmezler.[9] Benzer şekilde, acı biberde ve biber gazında bulunan kapsaisinden de rahatsız olmazlar. Bizi cayır cayır yakan ve ısıya aşırı duyarlı hale getiren kapsaisin, çıplak kör fareler üzerinde böyle bir etki göstermez. Yaygın kanının aksine, bu hayvanların ağrı hissetmediği doğru değildir. Çimdiklenmeyi ve yanmayı

sevmez, hardala acısını veren kimyasaldan kaçınırlar.[10] Buna karşılık bize acı veren birçok zararlı maddeye karşı kayıtsız kalırlar.

Ağrı deneyimimiz nosiseptör denen bir nöron sınıfına bağlıdır.[11] (Latince *nocere* "zarar vermek" anlamına gelir.) Bu nöronların çıplak uçları derimize ve diğer organlarımıza nüfuz eder. Bu uçlar, yoğun ısı ya da soğuk, ezici basınç, asitler, toksinler, yaralanma ve yangı (iltihap) sonucunda salınan kimyasallar gibi zararlı uyaranları saptayan sensörlerle doludur.* Nosiseptörler boyut, uyarılma derecesi ve enformasyon ileti hızı bakımından çeşitlilik gösterir; bu nitelikler bir araya gelerek batma, saplanma, yanma, zonklama, kramp ve ağrı gibi talihsiz tecrübelerimizi biçimlendirir.

Nosiseptörler hemen hemen tüm hayvanlarda bulunur; çıplak kör fareler de istisna değildir. Ancak onlardaki nosiseptörler hem sayıca daha az hem de çeşitli biçimlerde işlevsizleşmiştir.[12] Normalde asitlerin etkisiyle aktifleşen nosiseptörler, bu hayvanlarda asitler tarafından bloke edilir.[13] Kapsaisini saptayabilen nosiseptörler bunu hâlâ yapabilir ama oluşan sinyalleri normal koşullarda beyne ileten nörotransmiterleri üretmezler. Bu değişikliklerden bazıları göründüğü kadarıyla kolayca açıklanabilir: Çıplak kör fareler, asitten kaynaklanan acıyı hâlâ hissedebiliyor olsalardı yuvadaki odacıklarda biriken karbondioksitten ötürü uyurken muhtemelen acı içinde kıvranırlardı. "Ama kapsaisine neden tepki vermediklerini bilmiyoruz," diyor Park. Belki zamanla direnç kazandıkları çok baharatlı bir yumru kökle besleniyorlardır. Ya da belki tam tersine, milyonlarca yıl boyunca nispeten güvenli bir ortamda yaşadıktan sonra, artık ihtiyaçları kalmayan duyusal yetilerini yitirmişlerdir. Öyle ya da böyle, onların bu maddelerden etkilenmemesi bize, kapsaisinin ya da asitlerin doğası gereği acı verici olmadığını gösteriyor.

Kış uykusuna yatan ve çıplak kör fare gibi artan karbon dioksit düzeyleriyle başa çıkmak zorunda kalan başka memeliler de asitlere karşı duyarsızdır.[14] Biber tohumları taşıyan kuşlar kapsaisinin acısını

* Işık, moleküller ve ses gibi belli uyaranları saptayan görme, koku ve işitme duyularının tersine nosisepsiyon, zarar verme potansiyeli ortak çok farklı uyaranları tespit eder. Daha önce üzerinde durduğumuz koku duyusu ve birazdan inceleyeceğimiz dokunma gibi duyuların çeşitli unsurlarını bir araya getiren karmakarışık bir duyudur.

hissetmez.[15] İnsanlar, kedi nanesinin ürettiği ve sivrisinekleri uzaklaştıran bir kimyasal olan nepetalaktona karşı duyarsızdır.[16] Bize üzerimizde sigara söndürülmüş kadar yakıcı gelen akrep sokması, akrepler için amansız bir yırtıcı olan çekirge faresinin umurunda bile olmayabilir.[17] Bu farenin nosiseptörleri, akrep toksinlerini algıladığında *ateşlenmeyecek* şekilde evrilerek, normalde ıstırap verici olacak zehri bir ağrı kesiciye dönüştürmüştür.

İnsanlar genellikle ağrının hayvanlar âleminin tamamında aynı şekilde hissedildiğini varsayar ama bu doğru değil. Ağrı da tıpkı renkler gibi doğası gereği hem öznel hem de şaşırtıcı ölçüde değişkendir. Nasıl ki ışığın farklı dalga boylarını bütün hayvanlar kırmızı ya da mavi olarak görmüyor, kokuların ıtırlı ya da keskin olması evrensel bir nitelik taşımıyorsa hiçbir şey, hatta özellikle acı vermek için evrilmiş olan akrep zehrindeki kimyasalların acıtıcı etkisi bile evrensel değildir. Ağrı, hayvanları yaralanmaya ve tehlikeye karşı uyardığı için hayatta kalmaları açısından son derece önemlidir. Tüm hayvanlar bir şeylerden sakınır ama kaçınmak ya da tahammül etmek zorunda kaldıkları şeyler değişir. O nedenle, bir hayvana neyin acı verdiğini, hayvanın o anda acı çekip çekmediğini, hatta acı hissedebilir olup olmadığını anlamak açıkçası çok zordur.

1990'ların başında, nörofizyolog Charles Scott Sherrington, deride "cilt hasarına yol açan uyaranlara yanıt verecek şekilde özelleşmiş sinir uçları" bulunduğunu yazmıştı.[18] Bu sinir uçları beyinle bağlantılıyken "ciltte ağrı uyandırıyor", söz konusu bağlantılar kesilse bile "psişik özellikten yoksun" savunma reflekslerini tetikleyebiliyordu. Örneğin bir köpek, omurilik hasarı geçirmiş olsa da sertçe sıkıştırılan patisini geri çeker. Sherrington, zararlı uyaranları algılama eylemini, oluşturdukları ağrı hissinden ayrı tanımlayan, "daha nesnel olma avantajı"nı ifade eden bir terim kullanmak istiyordu. Sonunda *nosisepsiyon* terimini buldu.

Yüzyılı aşkın bir zaman sonra biliminsanları ve filozoflar hâlâ nosisepsiyon ile ağrı arasında ayrım yapıyor.[19] Nosisepsiyon, hasarı tespit ettiğimiz duyusal süreçtir. Ağrıysa bu sürecin ardından ortaya çıkan acı çekme halidir. Geçen hafta, kazara sıcak tavayı tuttuğumda derimdeki nosiseptörler yakıcı sıcaklığı hissetmişti. *Daha ne olduğunu*

anlayamadan, beni kolumu geri çekmeye zorlayan refleksi başlatan bu süreç nosisepsiyondur. Hemen ardından, nosiseptörlerden kalkan sinyaller beynime ulaşınca hissettiğim rahatsızlık ve sıkıntıysa ağrıdır. Bu ikisi yakından bağlantılı olmakla birlikte ayrı şeylerdir. Nosisepsiyon elimde (ve omuriliğimde) ortaya çıkmış, ağrıysa beynim tarafından üretilmişti. Bunlar aynı sürecin, bize çoğunlukla birbirinden ayrılmazmış gibi gelen duyusal ve duygusal iki yarısıdır.

Ama aslında *ayrılabilirler*. Ampütasyon geçiren ve kaybettiği uzvun hayalet kalıntısını hisseden kişiler, nosisepsiyon olmaksızın ağrı duyabilir. Bazı insanlar ağrıya karşı doğuştan kayıtsızdır;[20] doğdukları andan itibaren başkaları için acı verici duyumsamaların farkındadırlar ama kendileri rahatsız olmazlar.* Bazı ağrı kesiciler merkezî sinir sistemine tesir ederek bu etkinin aynısını oluşturur. Ağrı üzerine çalışan nörobilimci Robyn Crook, "Çene ameliyatından sonra Vicodin kullandım," diye anlatıyor. "O hissin hâlâ orada olduğunun tamamen farkındaydım ama çok sakindim." İnsanlar nosiseptörleri tetikleyen hardal, acı biber ya da yüksek ısının yol açtığı acıyı görmezden gelmeyi öğrenir, hatta bunlardan hoşlanırlar.†

Açıkçası, nosisepsiyon ile ağrı arasındaki ayrım, ikincisini daha az gerçek kılmaz. Kronik ağrılı rahatsızlıklardan mustarip olanlar (özellikle de kadınlar) tıp dünyasınca uzun süre ciddiye alınmadı ve ihmal edildi.[23] Bu insanlara, çektikleri acının yalnızca kafalarının içinde olduğunun ya da anksiyete gibi ruhsal problemlerden kaynaklandığının söylenmesi hataydı. Öznel bir durum olduğu için ağrıyı bu şekilde göz ardı etmek kolaydır. Zihinle bedenin birbirinden ayrı olduğunu savunan, modası geçmiş düalist inancın talihsiz ısrarından ötürü, *öznel* ile

---

* Bu durum tehlikeli olabilir. Ağrıya duyarsız çocuklar ve bebekler, yaralanmaların tehlikeli olduğunu öğrenmez ve çoğu zaman parmaklarını ısırır, başlarını sağa sola çarpar ya da bir yerlerini yakarlar. Hayatta kalanlarsa bazen istismara maruz kalır. Doğuştan ağrıya duyarsız olduğu belgelenmiş ilk vaka, sirkte vücuduna sivri cisimler batırılarak gösteri yapan bir adamdı. Bu durumdan mustarip Pakistanlı bir oğlansa sokakta kollarına bıçak saplayarak gösteri yapıyordu. On dördüncü yaş gününde çatıdan atladığı için öldü.[21]

† Leigh Cowart'ın, mazoşistleri, ultramaraton koşucularını, buzlu suda yüzenleri ve kendine bilerek acı veren diğer insanları incelediği *Hurts So Good* adlı kitabını hararetle tavsiye ederim.[22]

muğlak, *psikolojik* ile *hayalî* çoğu zaman bir tutulur. Bu yaklaşım, zarar verecek ölçüde hatalıdır. Mesele nosisepsiyonun vücudu ilgilendiren fiziksel, ağrınınsa zihni ilgilendiren psikolojik bir süreç olması değil. Her ikisi de nöronların ateşlenmesiyle ortaya çıkar. Mesele, insanlarda nosisepsiyon çevresel sinir sistemiyle sınırlı kalabiliyorken, ağrı söz konusu olduğunda beynin her zaman işin içine girmesidir. Ağrı, bir düzeyde bilinçli farkındalık gerektirir. Oysa nosisepsiyon onsuz da olabilir.

Nosisepsiyon kadim bir duyudur. Hayvanlar âleminde o kadar yaygın ve tutarlıdır ki aynı kimyasallar –opioidler– yaklaşık 800 milyon yıllık evrim sürecinde birbirlerinden ayrılmış olmalarına rağmen insanların, tavukların, alabalıkların, deniztavşanları ve meyve sineklerinin nosiseptörlerini teskin edebilir.[24] Fakat ağrı öznel bir his olduğundan, hangi canlıların ağrı hissettiğini anlamak zordur. Hatta insanların bile ağrısı olup olmadığını zar zor anlayabiliriz. "Bana başının çatlayacak gibi ağrıdığını söyleyebilirsin ama ben bunun senin için ne anlama geldiğini bilemem," diyor Crooks, "üstelik temelde aynı beyin yapısına sahip, türdeş bireyler olduğumuz halde." İnsanda ağrı duyusu üzerine çalışanların dayanak noktası hâlâ büyük ölçüde kişisel beyanlardır; hayvanlarsa tabii ki duyguları hakkında konuşamaz.* Tek yapabileceğimiz, davranışlarından anlam çıkarmaktır.

Bir farenin (ya da bir çıplak kör farenin) ayağını çimdiklerseniz hayvan bacağını çeker ve muhtemelen ayağını yalar ve tımar eder. Ağrı kesici vermek isterseniz kabul eder. Bunlar canı yanmış bir insanın davranışlarını andırır ve kemirgen beyni bizimkine yeterince benzediği için farenin nosiseptif refleksine ağrının eşlik ettiğini düşünmek akla yakın görünür. Ancak benzerliğe dayalı bu tür argümanlar her zaman sorunludur, özellikle de vücudu ve sinir sistemi çok farklı hayvanlar söz konusuysa. Bir sülüğü sıkıştırırsanız hayvan acıyla kıvranır ama bu, canı yanan bir insanın hareketlerine mi benzer yoksa sıcak tavaya değdiğinde refleks olarak geri çekilen bir kolun tepkisine mi? Bazı hayvanlar acısını gizleyebilir. Sosyal hayvanlar yaralanınca inleyerek yardım isteyebilir ama acı çeken bir antilop muhtemelen sessiz kalır çünkü imdat çağrıları

* Beyin taramalarının bir faydası olmaz: İnsan dışında acı çeken bir hayvanın bilinçli zihni, hatta acı çeken bir insanın bilinçli zihni şöyle dursun, herhangi bir bilinçli zihne işaret eden beyin aktivitesi örüntüleri bile açık değildir.

aslana antilobun zayıf olduğu mesajını verir. Ağrı belirtileri türden türe değişir.[25] O halde bir hayvanın acı çektiğini nasıl anlarız?

Tarih boyunca, hayvanların duygulardan yoksun olduğuna ve deneyimlerinin bilinçli olmadığına inanan düşünürler açısından önemsiz bir soruydu bu.[26] On yedinci yüzyıl düalisti René Descartes, hayvanların birer otomat olduğunu düşünüyordu. Descartes'tan alıntı yapan filozof ve rahip Nicolas Malebranche, "Hayvanlar zevk almadan yer, acı çekmeden ağlar, bilmeden büyür, hiçbir şey arzulamaz, hiçbir şeyden korkmaz, hiçbir şey bilmezler," diye yazmıştı. Son zamanlarda bu görüşler değişti; bugün çoğu biliminsanı memelilerin acı hissedebildiğini düşünüyor. Ancak balıklar, böcekler ve kabuklular gibi diğer hayvan grupları etrafında dönen şiddetli tartışmalar devam ediyor.[27*] Süregiden bu çatışmaların merkezinde nosisepsiyon ile ağrı arasındaki ayrım yatar. Hayvan refahı uzmanı, biyolog Donald Broom'a göre, bu ayrım "insanlarla diğer hayvanlar ya da 'daha gelişmiş' ve 'daha ilkel' hayvanlar arasındaki farklılıkların altını çizme çabalarının bir kalıntısıdır."[29] Ne de olsa diğer duyular söz konusu olduğunda, duyu reseptörlerinin eylemleriyle beynin ürettiği öznel deneyimler farklı biçimde adlandırılmaz. Göz üzerinde çalışan biliminsanları, insandaki görme duyusuna karşılık balıklarda sadece ışık algısı olup olmadığına dair tartışmaya girmez.

Fakat önceki bölümlerde gördüğümüz gibi, retinadaki hücrelerin saptadığı şeyle bilinçli görme deneyimi arasında bir fark *var*. Dan-Eric Nilsson'ın gözün evrimiyle ilgili dört aşamalı modelini hatırlarsanız: Görme üzerinde çalışan biliminsanları aslında basit ışık algısıyla uzamsal görmeyi birbirinden ayırır. Görüntüsüz görebilen deniztarağı gibi bazı canlıların, görme kavramımızın sınırlarını esnetebileceğini düşünürler. Görsel dünyamızın bazı yönlerinin, örneğin renklerin, beyin tarafından inşa edildiğini ve ışığın farklı dalga boylarını algılayabilen mantis karidesleri gibi bazı hayvanlarda renk algısının olmayabileceğini kabul ederler.

Kimyasal duyular (koku ve tat) söz konusu olduğunda, uyaranı fark etmeden algılayıp tepki vermek mümkündür. Şu anda öyle

* Prematüre bebeklerin ya da yenidoğanların ağrıyı algılayıp algılamadığı ya da ağrı kesicilerden fayda görüp görmediği hakkındaki tartışmalar 1980'lere dek devam etmişti.[28]

yapıyorsunuz. Tüm vücudumuzda –derimizde ve ayaklarımızda değil ama iç organlarımızda– tat reseptörleri bulunur.[30] Bağırsaklarımızdaki tatlı reseptörleri iştahı kontrol eden hormonların salıverilmesini denetler. Akciğerlerimizdeki acı reseptörleri alerjenleri tanıyıp bağışıklık sistemini harekete geçirir. Bütün bunlar biz farkına varmadan olup biter. Benzer şekilde bir sivrisineğin ayağındaki tat reseptörleri, hayvanın DEET'ten uzak durmasını sağlayan refleksi enformasyon böceğin beynine iletilmeden tetikleyebilir. Bir sineğin kanadındaki tat reseptörleri mikrop saptarsa temizlenme refleksini başlatır ve bunun olabilmesi için sineğin, mikrop ya da kanadın ne olduğunu bilmesi gerekmez. Bu davranışlar dışarıdan bakan birine düpedüz tiksintiden kaynaklanıyormuş gibi görünebilir ama böceğin beyninde bu tür duygulara yer olup olmadığı konusunda hiçbir fikrimiz yok.

Broom, ham algılama eylemiyle bunun sonucunda ortaya çıkan öznel deneyimleri nadiren birbirinden ayırt edebildiğimiz konusunda haklı. Fakat bunun sebebi, bu tür ayrımların olmaması değil, ayrımların genellikle önemli olmamasıdır. Bir deniztarağının ne gördüğü ya da kuşlarla insanların gördüğü kırmızının aynı renk olup olmadığı gibi sorular felsefi bakımdan ilginçtir. Ağrı ve nosisepsiyon arasındaki ayrım, hayvanları yakalama, öldürme, yeme ya da onlar üzerinde deney yapmaya ilişkin kültürel normlarımızı etkileyen, ahlaki, hukuki ve iktisadi açıdan hayati bir konudur. Ağrı (ya da dilerseniz nosisepsiyon) istenmeyen duyudur. *Yokluğu* (çıplak kör fareler ya da çekirge farelerinde olduğu gibi) bir süpergüç gibi hissedilen yegâne duyudur. Kaçınmaya çalıştığımız, ilaçlarla hafiflettiğimiz ve sebep olmaktan sakındığımız yegâne duyudur.

Görme ya da işitme duyuları üzerinde çalışan biliminsanları, inceledikleri hayvanlara birtakım görüntüler gösterip sesler dinletebilir. Fakat ağrı duyusunu araştıranlar, üzerinde çalıştıkları canlıların refahını artırabilecek bilgiyi ararken o canlılara zarar vermek zorunda kalır. Mümkün olduğunca az sayıda hayvan kullanmak isteseler de sonuçların istatistiksel açıdan anlamlı olması için yeterli sayıda hayvan kullanmaya mecburdurlar. İşleri ahlaki açıdan zorlayıcı ve çoğu zaman sinir bozucudur. "İnsanlar ya hayvanların mutlak surette bizim gibi acı hissettiği

için bunu araştırmanın abes olduğunu ya da tam tersine, acı hissetmedikleri için bunu araştırmanın abes olduğunu düşünüyor," diyor Robyn Crook. "Orta yolu bulan agnostiklerin sayısı pek fazla değil."

Balıklar, ağrı araştırmalarının rahatsız edici doğasına örnek teşkil eder. 2000'lerin başında Lynne Sneddon, Mike Gentle ve Victoria Braithwaite, alabalıkların dudaklarına arı zehri ya da asetik asit (sirkedeki yakıcı madde) enjekte ettiler.[31] Serum fizyolojik enjekte edilen alabalıkların tersine bu talihsiz balıklar hızlı hızlı nefes alıp vermeye başladı. Saatlerce yemek yemediler. Tankın dibindeki ince çakılın üzerinde iki yana sallanıyorlardı. Bazıları dudaklarını minik çakıl taşlarına ya da tankın duvarlarına sürtüyordu. Sanki bir şey dikkatlerini dağıttığı için tanımadıkları nesnelerden artık uzak durmuyorlardı ve bu etki morfin verildiğinde geçiyordu. Sneddon ve meslektaşları, enjeksiyonlardan sonra uzun süre devam eden bu davranışları nasıl olup da sadece nosisepsiyona atfedeceklerini bilemediler. Hayvanların acı çektiğini kendi gözleriyle görmüşlerdi.

2003'te yayımlanan bu çalışmalar çığır açıcı nitelikteydi. Bilimsel metinler, olta balıkçılığı dergileri ve Nirvana'nın şarkı sözleri,* balıkların acı hissetmediği inancını yaymıştı. Kancanın ucundaki balığın çırpınmaları, acı çekme belirtisi olmaktan çok basit reflekslerdi. Balıkların nosiseptörleri olup olmadığını dahi kimse bilmiyordu, ta ki Sneddon'ın ekibi reseptörlerin varlığını doğrulayana dek. Sneddon bu işe başladığında veteriner hekim adaylarına ya da olta balıkçılığı yapan gruplara, balıkların acı hissedip hissetmediğini sormuş. "Birkaç kişi evet yanıtını vermişti," diyor. On yedi yıldır giderek artan kanıtlar sayesinde şimdi "hemen hemen herkes elini kaldırıyor."

Balıklarda nosiseptörlerin ateşlenmesi sonucunda ortaya çıkan sinyaller, beynin öğrenmeyle ve basit reflekslerden daha karmaşık davranışlarla ilgili bölümlerine gider.[32] Çimdiklenen, elektrik şoku verilen, toksin enjekte edilen hayvanlar elbette saatlerce ya da günlerce veya ağrı kesici verilinceye dek farklı davranır.[33] O ilaçları almak ya da daha fazla rahatsızlıktan kaçınmak için ödün verirler. Sneddon bir deneyde,

* Yazar, Nirvana'nın *Something in the Way* şarkısına gönderme yapıyor: "It's okay to eat fish 'cause they don't have any feelings." [Balık yemekte sakınca yok çünkü onların duyguları yok.] (*ç.n.*)

zebra balıklarının bitkilerle dolu, ince çakıl döşeli bir akvaryumu, boş olana yeğlediğini gösterdi.[34] Ama balıklara asetik asit enjekte edip akvaryum suyuna ağrı kesici karıştırdığında, hayvanlar normal tercihlerinden vazgeçip sıkıcı ama rahatlatıcı ortamı tercih etmişti. Bir başka çalışmada Sarah Millsopp ve Peter Laming, Japon balıklarını akvaryumun belli bir bölümünde beslemeye alıştırdıktan sonra hayvanlara elektrik şoku verdiler.[35] Balıklar kaçtı ve yiyecek aramaktan vazgeçip günlerce oradan uzak durdular. Sonunda geri gelmişler ama aç olduklarında ya da verilen şok hafifse daha çabuk dönmüşlerdi. İlk kaçışları reflekse dayalı olabilirdi ama sonrasında, daha fazla zarar görmemek için durumun artılarını ve eksilerini tartmışlardı. Braithwaite'in, *Do Fish Feel Pain?* adlı kitabında yazdığı gibi, "Balıkların da ağrı hissettiğine ve acı çektiğine dair, kuşlar ve memelilerde olduğu kadar çok delil var."[36]

Ancak eleştirel yaklaşan bir grup hâlâ ikna olmuş değil.[37*] Bu grup, Sneddon ve diğerlerini insanbiçimcilikle ve çalışmalardaki balıklara insan perspektifinden bakmakla suçluyor. Bu balıkların davranışlarının büyük ihtimalle bilinçli olmadığını ileri sürüyorlar. Ne de olsa balık beyni daha fazlasını yapabilecek kapasiteye sahip değil. Beynimizin üst kısmını neokorteks dediğimiz, bir mantarın şapkasını andıran, kalın bir sinir dokusu oluşturur. Beynimiz, bilincin müziğini ve acının ağıtını üretmek için birlikte hareket eden birçok özel bölümden oluşan bir orkestra gibi düzenlenmiştir. Fakat balık beyninde neokorteks yoktur. 2014'te yayımlanan "Balıklar Gerçekten Acı Hisseder mi?" başlıklı bir makalede, şüpheci yedi kişi, "Balıklar nörolojik açıdan bilinçli ağrı duyusu ve hislerle değil, bilinçsiz nosisepsiyon ve duygusal tepkilerle donatılmıştır," diye yazmıştı.[39]

İşin garip yanı, bizzat bu argümanın büyük ölçüde insanbiçimci olmasıdır.[40] Sırf insanlarda öyle olduğu için neokorteksin ağrı hissedebilen tüm hayvanlarda bulunması gerektiğini pervasızca kabul eder. Ama bu doğruysa neokorteksleri olmadığı için kuşlar da acı duyamaz. Aynı hatalı mantıkla düşünecek olursak balıklar dikkat, öğrenme ve sahip

* Tartışma hakkında fikir sahibi olmak için Sneddon'ın ve James Rose öncülüğünde bir grup araştırmacının yazdığı derlemeleri karşılaştırın. Ayrıca Brian Key'in "Balıklar Neden Acı Hissetmez" başlıklı makalesini ve ona karşı çıkan onlarca yanıtı da okuyabilirsiniz.[38]

oldukları birçok yetenek gibi, neokorteksten köken alan diğer zihinsel becerilerden de yoksun olmalıdır.[41] Hayvanlar çoğunlukla aynı sorunlara farklı çözümler ve aynı görevlere yönelik farklı yapılar üretir. Balığın insandakine benzer bir neokorteksi olmadığı için acı hissetmediğini iddia etmek, sineklerin kamera tipi gözleri olmadığı için göremediğini söylemeye benzer.

Yine de eleştirilerde bir haklılık payı var: Tüm hayvanların acıyı ve diğer bilinçli deneyimleri yaşayabildiğini varsayamayız. Bilinç, tüm yaşamın doğasında olan bir özellik değildir. Bilinç, sinir sistemlerinden köken alır ve bu sistemler, bir neokorteks olmasa bile yeterli işlem gücüne gereksinim duyar. Sözgelimi yengeçler ve ıstakozlar, ritmik mide hareketlerini kontrol etmek için yaklaşık 30 hücreden oluşan bir nöron kümesi kullanır.[42] Buna karşılık, bir yuvarlak solucan olan *C. elegans*'ın toplam 302 nöronu vardır. Bu solucan, yengecin midesini çalkalamak için gerekenin sadece on katı kadar nöronla öznel deneyimler üretebilir mi? Pek mümkün görünmüyor. "Bir noktada sinir sistemi fazla küçük gelir," diyor Robyn Crook. "Pek ama ne kadar beyin gücü yeterlidir?" İnsandaki 86 milyar nöron mu, köpekteki 2 milyar nöron mu yoksa faredeki 70 milyon ya da lepistesteki 4 milyon veya meyve sineğindeki 100 bin nöron mu? Crook, bir deniztavşanındaki 10 bin nöronun yeterli olabileceğinden şüpheli ama "10.057 nöron gerektiğini de kimse söyleyemez," diyor.

Önemli olan sadece toplam nöron sayısı değil, bu nöronlar arasındaki bağlantılardır.[43] İnsan beyninde yüz binlerce nöron, korteksimizdeki orkestranın farklı bölümlerini birbirine bağlar. Bu bağlantılar sayesinde duyusal ipuçlarını olumsuz duygularla, kötü anılarla ve başka şeylerle birleştirip acı verici bir deneyimin senfonisini çalabiliriz. Fakat bu tür bağlantılar böceklerin beyinlerinde çok daha seyrektir.[44] Bir meyve sineğinin nosiseptörleri, beyninin mantar gövdesi denen ve öğrenmede kritik rol üstlenen bir bölümüyle bağlantılıdır. Fakat mantar gövdesinde, beynin diğer bölgelerine ulaşan sadece 21 çıktı nöronu bulunur. Sinek nosiseptif uyarandan kaçınmayı öğrenebilir ama aldığı ders, insanda acı çekmenin özünde var olan kötü hisleri de beraberinde getirir mi? Hatta böceklerin beyninde, insan beyninde duyguların işlendiği amigdala benzeri bir bölge bile olmayabilir. Nitekim böcek

davranışlarını araştıran fizyolog Shelley Adamo, "Bu da bir böcekteki öznel acı deneyimini anlamamızı zorlaştırıyor," diyor.

Hemen ardından, bir böceğin duygusal merkezinin neye benzediğini nereden bileceksiniz, diye ekliyor Adamo. Bırakın diğer hayvanların beynindeki bağlantıların nasıl kurulduğunu, *insan* beyninin bile nasıl çalıştığı hakkında ne kadar az şey bildiğimiz göz önüne alınırsa ağrıyı deneyimlemek için o veya bu nörolojik özelliğin gerekli olup olmadığını kesin olarak söylemek için henüz erken gibi geliyor. Üstelik bazı hayvanlar, basit beyinlerinin sınırlarını aşmış görünüyor.

Biyolog Robert Elwood, 2003'te, Kuzey İrlanda'nın Killyleagh bucağındaki bir barda ünlü şef Rick Stein ile karşılaşmıştı. "Kabuklulara ortak bir ilgimiz var: Ben onların davranışlarını inceliyorum, siz ise onları pişiriyorsunuz," demişti Elwood. Stein hemen ardından sormuştu: "Acı hissediyorlar mı?" Elwood öyle olduğunu düşünmese de gerçek yanıtı bilmiyordu. Sonrasında bu soru beynini kemirmeye başlayınca yanıtı bulmak için kolları sıvadı. "Çabuk sonuçlanan bir proje olacağını ve yolumuza devam edeceğimizi düşünüyordum," diyor. "Ama öyle olmadığı anlaşıldı."

Elwood, Avrupa sahillerinde sık görülen ve yumuşak karnını boş deniz kabuklarına sokan keşiş yengecini inceledi. Bu kabuklar değerli birer mülktür ve onlar olmadan yengeçler savunmasız kalırlar. Fakat Elwood ve meslektaşı Mirjam Appel, küçük bir elektrik şoku verildiğinde yengeçlerin kabukları tahliye ettiğini keşfettiler.[45] Bu kaçışlar refleks gibi göründüyse de yengeçler her zaman kaçmıyordu. Onları en sevdikleri deniz salyangozunun [*periwinkle shells*] kabuğundan çıkarmak için uygulanan şokun, daha az sevdikleri bir türün [*flat-top shells*] kabuğundan çıkarmak için gerekenden daha güçlü olması gerekiyordu. Suda yırtıcı hayvanların kokusunu alırlarsa kabuklarını terk etme olasılığı yarı yarıya azalıyordu. "Bu da kaçışlarının bir refleks olmadığı anlamına gelir," diyor Elwood. Yengeçler, çeşitli kaynaklardan gelen bilgiyi tarttıktan sonra tahliye kararı veriyorlardı.

Ayrıca yengeçlerin davranışları elektrik şokundan sonra uzun süre farklı kalıyordu. Kaçtıktan sonra, tehlikeli biçimde savunmasız kalmalarına rağmen kabuklarına dönmemişlerdi. Karınlarının şoka maruz

kalan yerlerini tımar etmişlerdi. Kabuklarını terk etmeseler bile yeni bir kabuğu kabul ederken her zamankinden farklı olarak, dikkatlice tetkik etmeden daha hızlı davranmışlardı. Elwood'un söylediğine göre bu verileri acı hissetmekle uyumlu ama kabukluların gerçekten ne hissettiğini bilmek imkânsız.[46] "Yengeçlerin ve ıstakozların acı hissedip hissetmediği sorusuyla sık karşılaşırım," diyor, "ve 15 yıllık araştırmanın ardından buna ancak 'olabilir' yanıtını verebiliyorum."

Kabuklular, evrimsel açıdan böceklerle akrabadır ve sinir sistemleri de onlarınki gibi basittir. Buna rağmen Elwood'un yengeçleri karmaşık davranışlar sergilemişti. Bu tutarsızlığı nasıl açıklayabiliriz? Bir hayvanın hareketlerinin, beyninin teorik olarak yapabilecekleriyle uyumlu olmaması, davranışlarını abartılı yorumladığımızı mı gösterir yoksa sinir sistemini hafife aldığımızı mı? Sneddon ve Elwood ikincisinin, Adamo'ysa ilkinin doğru olduğunu iddia ediyor. Kimin haklı olduğu ya da her iki tarafın da haklı olup olmadığı gerçekten belli değil.*

"Beynin büyüklüğünü bir mesele haline getirmek, dikkatleri amacından saptırıyor olabilir," diyor Adamo ve onun yerine acının evrimsel açıdan getirisini ve bedelini düşünmeyi tercih ediyor. Bedel derken çekilen ıstırabı değil, harcanan enerjiyi kastediyor. Evrim, böceklerin sinir sistemini minimalizme ve verimliliğe doğru iterek, küçük kafalara ve bedenlere olabildiğince fazla işlem gücü sığdırmıştır.[48] Fazladan herhangi bir zihinsel beceri –sözgelimi bilinç– daha fazla nöron gerektirir ve bu da zaten son derece kısıtlı enerji bütçesini tüketir. Bu bedeli ancak önemli bir fayda elde edeceklerse ödemelidirler. Peki ama acıdan ne gibi bir kazançları olabilir?

Nosisepsiyonun evrimsel faydası gayet açıktır. Nosisepsiyon hayvanların, onlara zarar verebilecek ya da onları öldürebilecek şeyleri saptayıp kendilerini korumak için adım atmalarını sağlayan bir alarm sistemidir. Buna karşılık acının kökeni o kadar açık değildir. Acı çekmenin uyum sağlamaya katkısı nedir? Nosisepsiyon niye *berbat* bir şey olmak zorunda? Bazı biliminsanları nahoş duyguların, nosiseptif duyunun

* Hayvanların acı duymasıyla ilgili tartışmalar son derece sert olabilir. Fakat Adamo, Sneddon ve Elwood'un hayvanlarda acının tanımlanması üzerine ortak bir derleme yayımlamaları ve aynı fikirde olmamalarına rağmen birbirlerinin görüşleri hakkında iyi niyetli konuşmaları dikkat çekicidir.[47]

etkisini yoğunlaştırmış ve pekiştirmiş olabileceğini, böylece hayvanın, o anda canını yakan şeyden sakınmakla kalmayıp gelecekte de ondan uzak durmayı öğrendiğini ileri sürüyorlar.[49] Nosisepsiyon, "Uzaklaş" der, acıysa "Geri dönme". Fakat Adamo ve diğerleri, hayvanların öznel deneyimler olmadan da tehlikelerden mükemmel biçimde kaçınabileceğini iddia ediyor. Robotların neler yapabildiğine baksanıza.

Mühendisler acı çekiyormuş gibi davranabilen, olumsuz deneyimlerden ders çıkarabilen ya da yapay rahatsızlıklardan kaçınabilen robotlar tasarladılar.[50] Bu davranışlar hayvanlar tarafından gerçekleştirildiğinde ağrı göstergesi olarak yorumlanmıştır. Fakat robotlar aynı davranışları öznel deneyimler olmaksızın gerçekleştirebilir. Bu, Descartes'ın yaptığı gibi hayvanların düşünmeyen, hissetmeyen otomatlar olduğunu iddia etmek anlamına gelmez; Adamo'nun dediği gibi, "Hiçbir robot bir böcek kadar karmaşık değildir." Onun kastettiği, böceklerin sinir sistemlerinin, karmaşık davranışları olası en basit yollardan gerçekleştirecek şekilde evrilmiş olduğudur ve robotlar bize bunun ne kadar basit olabileceğini gösterir. Eğer biz robotları, acının mümkün kıldığı söylenen, adaptasyona yönelik tüm eylemleri gerçekleştirecek şekilde, ayrıca bir bilinç programlamaya gerek olmaksızın programlayabiliyorsak o zaman çok daha uzun bir zaman diliminde çalışan ve yenilikçi yönü çok daha üstün olan evrim, minimalist böcek beyinlerini kesinlikle aynı yöne itmiş olmalı. O nedenle Adamo, böceklerin (ya da kabukluların) acı duymasının pek muhtemel olmadığını ya da en azından onların acı deneyiminin muhtemelen bizimkinden çok farklı olduğunu düşünüyor. Aynısı balıklar için de geçerli. "Onlarda da *bir şey* olmasını beklerim ama nedir o şey?" diyor Adamo. "Muhtemelen bizimkiyle aynı değil."

Bu nokta çok önemli. Hayvanların hissettiği acı hakkındaki tartışmalarda, çoğunlukla ya bizim gibi hissettikleri ya da hiçbir şey hissetmedikleri, küçük insanlara ya da karmaşık robotlara benzedikleri varsayılır. İkisinin arası bir durumu hayal etmek zor olduğundan, bu dikotomi yanlış olduğu halde hâlâ devam etmektedir. Bazı insanların daha bulanık görmesine benzer şekilde, bazılarının da ağrı *eşiğinin* diğerlerininkinden farklı olduğunu biliyoruz. Fakat niteliksel açıdan farklı bir ağrı biçimi, kavramsal olarak deniztarağının görüntüsüz görmesi kadar zorlayıcıdır. Bilinç olmadan acı olabilir mi? Acıyı duygudan arı

kılarsanız geriye sadece nosisepsiyon mu kalır yoksa hayal gücümüzün doldurmaya çalıştığı gri bir alan mı? Belki de diğer duyulara kıyasla ağrı duyusunun canlıdan canlıya *değişebileceğini* unutmak kolaydır ama bunun nasıl olabileceğini kavramak zordur.

Avrupa Birliği, 2010 Eylül'ünde hayvan araştırmalarıyla ilgili düzenlemelerini kafadanbacaklıları (ahtapotları, kalamarları ve mürekkepbalıklarını içeren grup) kapsayacak şekilde genişletti. Omurgasız hayvanlar olan kafadanbacaklılar genellikle fareler ya da maymunlar gibi omurgalı laboratuvar hayvanlarının refahını koruyan yasaların kapsamına girmez. Öte yandan bu hayvanların sinir sistemleri, çoğu omurgasızınkinden çok daha büyüktür; sözgelimi ahtapotta 500 milyon, buna karşılık meyve sineğinde 100 bin nöron bulunur.[51] Sürüngenler ve amfibiler gibi bazı omurgalılarınkini aşan zekice ve esnek davranışlar gösterirler. Ayrıca AB direktifinde vurgulandığı üzere, "ağrı, ıstırap, sıkıntı ve kalıcı zarar deneyimleyebildiklerine dair bilimsel deliller bulunmaktadır."[52] Bu ifade, kafadanbacaklılarla çalışan ve böyle bulgulardan haberi bile olmayan Robyn Crook için sürpriz olmuştu. Anlaşılan AB, zeki hayvanların acı çekebiliyor olması gerektiğini varsayıyordu. Fakat o zamanlar, bırakın acı hissedip hissetmediklerini, nosiseptörlerinin olup olmadığını dahi bilen yoktu. "O sırada bilimin bildikleriyle, yasa yapıcıların bilimin bildiğini varsaydıkları arasında büyük bir kopukluk vardı," diyor Crook.

Bu kopukluğu gidermek için, Kuzey Atlantik'te sık yakalanan, yaklaşık 30 santimetre boyundaki uzun yüzgeçli kalamarla işe başladı.[53] Bu hayvanın kollarının uçları, sıklıkla saldırgan rakip kalamarlara ya da yengeç kıskaçlarına kurban gider. Crook, kalamarlarda neşter kullanarak benzer yaralar açtı. Kalamarlar, beklendiği gibi, geride dikkat dağıtıcı mürekkep bulutları bırakarak hızla uzaklaşıp kamufle olmak için renk değiştirdiler. Üzerinden birkaç gün geçmiş olsa bile daha hızlı kaçıp saklanıyorlardı. Ancak şaşırtıcı bir şekilde insanların, farelerin, hatta keşiş yengeçlerinin tersine yaralarını hiç ellemediler, tımar etmediler veya sarıp sarmalamadılar. Diğer yedi koldan herhangi biriyle yaralı kola kolayca erişebilecekleri halde denemediler bile.

Daha da şaşırtıcı olansa Crook'un, yaralı kalamarın sanki bütün vücudu ağrıyormuş gibi davrandığını keşfetmesiydi.[54] İnsanların ve diğer

memelilerin bir yerinde bir kesik ya da berelenme olduğunda hasarlı bölge acır ama vücudun geri kalanında bir şey hissedilmez. Elim yanarsa yanan yere bastırdığımda canım acır ama ayağıma bastırırsam bir şey olmaz. Fakat Crook kalamarın yüzgeçlerinden birine zarar verdiğinde, karşı yüzgeçteki nosiseptörler de yaralı taraftakiler kadar uyarılabilir durumda oluyordu. Ayağınızı bir yere çarptığınızda bütün vücudunuzun dokunmaya karşı hassaslaştığını farz edin. Kalamarın gerçeği budur işte. "Yaralandıkları zaman bütün vücut aşırı duyarlılık kazanır," diyor Crook. "Normal olmaktan çıkan hayvan, potansiyel acı dünyasına adım atar." Bu durum, yaralarını niye tımar etmediklerini de açıklayabilir. Kalamar yaralandığını hissedebilir ama yaralanan yerin *neresi* olduğunu bilemeyebilir.

Memelilerin ağrıyı belli bir yerde hissetmeleri, yaşam devam ederken vücudun hassas kısımlarını koruyup temizlemelerine olanak tanır. Bu kadar yararlı bir bilgi kaynağı kalamarda niye bulunmaz? Crook bunun bir ihtimal, "kalamarın okyanustaki her şey için potansiyel bir av olması"ndan kaynaklanabileceğini söylüyor. Yaralı kalamar daha fazla dikkat çektiği ya da daha kolay bir av gibi göründüğü (veya öyle koktuğu) için yırtıcı balıklara özellikle çekici gelir. Bütün vücudu teyakkuza geçmiş bir kalamar, nereden gelirse gelsin saldırıyı daha kolay savuşturabilir.[55*] Ayrıca duyarlılığın tüm vücuda yayılması, bedenindeki çoğu yere fiziksel sebeplerle ulaşamayan hayvanlar için mantıklıdır. Kolunun yaralandığını bilmek, bu konuda bir şey yapamadığı sürece havanın ne işine yarar ki?

Ahtapotlarsa farklıdır. Kalamarın tersine ahtapot vücudunun her yerine *dokunabilir*. Hatta kollarını içine sokup solungaçlarını tımar edebilir; bu, bir insanın elini boğazından sokup akciğerlerini kaşıması gibi bir şeydir. Açık sulardaki gruplarda sıkışıp kalan ve bir gün bile izin alamayan kalamarın tersine ahtapot, kendini daha iyi hissedene dek ıssız yuvasında saklanabilir. Yaralarıyla ilgilenecek zamanı ve becerisi olduğundan, hasarın yerini bilmek, ahtapot için mantıklıdır. Nitekim Crook, ahtapotların bunu bildiğini gösterdi. Ahtapotlar bazen ucu yaralı kolu koparıp geride

* Crook bunu bir deneyle doğruladı. Levreklerin özellikle yaralı kalamarları hedef aldığını ve bu kalamarların yaralı olmayanlardan daha hızlı kaçabildiğini gösterdi. Yaralı kalamarlara anestetik madde verince hayvanlar daha yavaş kaçmaya başladı ve hayatta kalma şansları azaldı.[56]

bırakır.[57] Çevresindeki kollardan daha hassas olan güdüğü gagasına alır. Crook, 2021'de yayımlanan son çalışmasında, ahtapotların, kendilerine asetik asit enjekte edilmiş yerlerden uzak durduğunu ama ağrı kesici verilen yerlere yöneldiklerini saptadı.[58] Ayrıca hayvanlar lokal anestezi uygulandıktan sonra yaralı kollarını tımar etmekten vazgeçmişti. Crook son makalesinde açıkça şöyle diyor: "Ahtapotlar acı çekebilir."

Crook, bu çalışma yayımlanmadan önce de laboratuvar çalışmalarını kafadanbacaklıların acı hissettiğini varsayarak yürüttüğünü söylemişti. Onun yaptığı çalışmalar, örneğin anestetiklerin kafadanbacaklılar üzerinde etkili olup olmadığını incelemesi, bu hayvanların refahını artırabilir. Crook, çalışmanın istatistiksel gücünü korumak koşuluyla mümkün olduğunca az hayvan kullanıyor ve yaralanmaların asgari düzeyde olmasına özen gösteriyor. Hayvan araştırmalarının etiği üzerine düşünmek, özellikle de yapılan araştırma ağrı duyusuyla ilgiliyse kolay değil ama "zaten *zor* olması gerektiğini düşünüyorum," diyor Crook. "Bir deneyde, hayvana acı çektirmeseniz bile yaptığınız şeyden ötürü üzülüyor olmalısınız. Hayvanlar çalışmaya gönüllü katılmaz. Daha geniş anlamda amacım onların acısını dindirmek olsa da tankın içindeki hayvan bunu bilmiyor."

Ağrı duyusunu araştıran birçok biliminsanı aynı şeyi düşünüyor. Kafadanbacaklılar, balıklar ya da kabuklular ister kendilerine yaptıklarımızı hissediyor ister tamamen farklı bir deneyim yaşıyor olsun, biliminsanları bulguların ihtiyatlılık ilkesini devreye sokmak için yeterli olduğunu savunuyor. "Bu hayvanların acı çekiyor olması kuvvetle muhtemel," diyor Elwood, "ve biz de bu acıyı nasıl önleyeceğimizi düşünmeliyiz".

Hayvanlardaki ağrı duyusuna ilişkin tartışmalar çoğu zaman basit bir soru etrafında döner: *Acı hissederler mi?* Bu sorunun ardında başka imalar yatar: *Istakozu haşlamak doğru mu? Ahtapot yemekten vazgeçmeli miyim? Balık tutabilir miyim?*[*] Hayvanların acı çekip çekmediğini

[*] Bu soruların yanıtları ayrı bir kitap olur. Burada yalnızca öznel acının, hayvan refahı hakkında düşünürken göz önünde bulundurulması gereken şeylerden sadece biri olduğunu, hatta en önemlisi olmayabileceğini belirtmekle yetineceğim. Veteriner hekim Frederic Chatigny, "Nosisepsiyonun hayvan refahını etkilemek için fazlasıyla yeterli olduğunu, dolayısıyla tedavi gerektirebileceğini kabul edebiliriz," diye yazmıştır. "Bilinçle tanımlanıyor olsa da ağrının, hayvanın esenliğini olumsuz yönde etkilemesi gerekmez."[59]

sorarken, aslında onlar hakkındaki sorulardan çok, *onlara neler yapabileceğimizi* soruyoruz. Bu tutum, hayvanların gerçekte ne hissettiğine dair anlayışımızı sınırlıyor.

Mesele, acının var olup olmamasından daha karmaşıktır. Shelley Adamo, ağrı duyusunun faydalarını ve bedellerini daha iyi anlamamız gerektiği konusunda haklı. Boşu boşuna acı çekilmez. Herhangi bir şey sebepsiz acıtmaz. Hayvanlar bu bilgiyi kullanarak eyleme geçebildiği için bazı şeyler acı verir. Gereksinimlerini ve kısıtlılıklarını anlamadan, hayvanların davranışlarını doğru yorumlamamız zor.

Örneğin böcekler çoğu zaman dayanılmaz acı çektikleri izlenimini veren korkutucu şeyler yapar.[60] Topallayacaklarına ezilmiş bir bacağa yüklenmeye devam ederler. Erkek peygamberdeveleri dişiler tarafından iştahla mideye indirilirken çiftleşmeye devam eder. Asalak eşekarısı larvalarının içten içe yediği tırtıllar yaprağı kemirmeye devam eder. Hamamböcekleri mecbur kalırsa kendi bağırsaklarını yer. Craig Eisemann ve meslektaşları 1984'te, bu davranışlar için "ağrı duyusunun, varsa bile davranış üzerinde adaptasyona yönelik herhangi bir etkisi bulunmadığını kuvvetle düşündürüyor," diye yazmışlardı.[61] Ama bu davranışlar belki de sadece, böceklerin nelere katlanmaya istekli olduğunu gösterir. Belki de hamamböcekleri ve peygamberdeveleri acı karşısında proteine ve üremeye öncelik vermekte, bir yarışın ya da çarpışmanın ortasındaki atletler veya askerler gibi acıya tahammül etmektedir. Belki de tırtıllar acılarını hafifletemedikleri için canlı canlı yenmenin acısını hissetmezler.

Kalamarları ve ahtapotları düşünün. Her ikisi de kafadanbacaklı olduğu halde 300 milyon yıldan uzun süredir, yani kabaca memelilerle kuşların ayrıldığı zamandan beri evrimleri birbirinden bağımsız devam ediyor. Vücutları ve yaşam tarzları birbirinden tamamen farklı bu hayvanların sinir sistemlerinin de yaralanmadan sonra çok farklı işlev görmesi şaşırtıcı olmasa gerek. Kafadanbacaklıların acı hissedip hissetmediği yerine, *hangilerinin* acıyı *nasıl* deneyimlediğini sorabiliriz. Bilinen 34 bin balık, 67 bin kabuklu ve kimbilir kaç milyon böcek türü için de aynısı geçerli. Yakın akraba olan hayvanların bile dünyayı farklı biçimde algıladığını, görme ve koku gibi başka duyulardan biliyorken, bu grupların hepsini aynı kefeye koymamız abes olur.

Bir hayvanın acı hissedip hissetmediği sorusuna odaklanmak yerine, fizyolog Catherine Williams'ın dediği gibi, "Hangi koşullarda ve hangi uyaranların etkisiyle acıyı hissetmek, deneyimlemek ve göstermek bir avantajdır?" sorusunu sorabiliriz. O zaman, oyuk açan çıplak kör farede ya da akrep avlayan farede, uzun kollu ahtapotta ya da kısa kollu kalamarda ağrının farklı biçimlerde tezahür ettiğini görürüz. Topluluktaki bireylerden yardım isteyebilen sosyal hayvanlarda ya da başının çaresine bakmak zorunda olan yalnız hayvanlarda, kısacık ömründe hatalarını tekrarlama şansı çok az olan ya da tekrar tekrar hata yapabilecek kadar uzun yaşayan şanslı hayvanlarda acının farklı biçimleriyle karşılaşabiliriz. Ayrıca kavurucu sıcaktan dondurucu soğuğa, uç sıcaklıklara tahammül etmek zorunda kalan hayvanlarda ağrı duyusunun farklılıklar gösterebildiğini öğreniriz.

5.

Çok Soğuk

Isı

Üşüyorum. Dışarıda ılık bir sonbahar havası var, sıcaklık 24°C ama ben, sıcaklığın sadece 4°C olduğu, içine girebileceğiniz kadar büyük bir buzdolabının içindeyim. Burası yapay bir hibernakulum, yani kış uykusuna yatan hayvanların kışı geçirdiği karanlık, soğuk koşulları taklit etmek üzere tasarlanmış bir oda. Böyle gezilerde uygun kıyafet seçme konusunda alenen beceriksiz olduğumdan, bu kez de ince bir tişörtleyim. Hızla ısı kaybeden çıplak kollarımı içgüdüsel olarak ovalıyorum. Daha makul giyinen Maddy Junkins ise bir kutuya uzanıp kâğıt kırpıntılarının arasından küçük tüylü bir yumak çıkarıyor. Bu, bir on üç çizgili yer sincabı. Aşağı yukarı bir greyfurt büyüklüğündeki hayvan kıvrılıp top olmuş, kuyruğu burnuna değiyor. Sırtından aşağı inen 13 siyah şerit ve aralarındaki açık renkli beneklerle büyük, süslü bir çizgili sincaba benziyor. Gözlerim odayı aydınlatan kırmızı ışığı algılayabildiği için bu desenleri görebiliyorum. Ama sincap göremiyor çünkü sımsıkı kapalı gözlerini ne olursa olsun açmıyor. Eylül ortasındayız ve uzun kış uykusu mevsimi başladı.

Kış uykusu (hibernasyon) aslında uyku değil, yer sincabının Kuzey Amerika'da sert geçen kış mevsiminde hayatta kalmasını sağlayan, daha yoğun bir durgunluk halidir.[1] Bu dönemde sincabın metabolizması neredeyse tamamen durur.* Junkins onu eldivenli elime nazikçe

* Bu iki süreç birbirinden o kadar farklıdır ki kış uykusuna yatan yer sincapları aslında uykusuz kalır ve ara sıra gerçekten uyuyabilmek için biraz hareketlenip vücut sıcaklıklarını yükseltirler.[2]

bıraktığı anda, sincabın hareketsizliği karşısında afallıyorum. Bu hayvanda kemirgenlerin manik, gergin enerjisinden eser yok. Telaşlı nefeslerle titremesi beklenen böğrü kıpırdamıyor. Yazın saniyede en az beş kez atan kalbi şimdi ancak bir dakikada o kadar atıyor.[3] "Eline aldığında genellikle kıpır kıpır olurlar ama bu haldeyken hiç de öyle değiller," diyor Junkins. "Hareketsiz, soğuk bir kütle." Hakikaten biraz sonra dokundukça rahatsızlık verecek kadar soğuk gelmeye başlıyor. Yaz için normalde 37°C olan vücut sıcaklığı, şimdi odadaki bütün cansız nesneler gibi 4°C civarında. Sıcaklığını ve görünürde canlılığını kaybetmiş sincap da esrarengiz bir şekilde cansızmış gibi geliyor. Yalnızca, tuttuğumda yavaş da olsa geri çektiği pembe patileri gerçekten de yaşadığını doğruluyor. Fazla uzun tutarsam elimin sıcaklığıyla uyanabileceği için sincabı derme çatma yuvasına koyup hibernakulumdan çıkıyorum. Dışarıda, tesisin sorumlusu Elena Gracheva bekliyor.

"Nasıldı?" diye soruyor.

"Çok soğuktu," diyorum.

Gracheva, ısı ve hayvanların ısıyı nasıl algıladıkları üzerine çalışan bir akademisyen. Vampir yarasaları ve çıngıraklıyılanları (onlara daha sonra geleceğiz) incelemiş olan Gracheva, son zamanlarda daha sevimli bir hayvan olan on üç çizgili yer sincabı ve onun düşük sıcaklıklara dayanabilme yetisiyle ilgilenmeye başlamış. "Beni soğuk bir odaya koyarsanız ağrı hissetmeye başlarım, sonra da hipotermiye girerim," diyor. "Muhtemelen 24 saatten fazla hayatta kalamam." Oysa on üç çizgili yer sincabı, yılın yarısını 2°C–7°C arasında geçirebilir.[4] Yakın akrabası Arktik yer sincabı −2,9°C'ye kadar inen daha da düşük sıcaklıklara dayanabilir. Bu dayanıklılık, genellikle dikkatten kaçan önemli bir yetiye bağlıdır: Sincap *soğuğu umursamaz.*

Gracheva ile çalışan Vanessa Matos-Cruz, bunu, yer sincaplarını bir çift ısıtıcı tablanın üzerine koyarak gösterdi.[5] Tablalardan biri 30°C, diğeri 20°C'ye ısıtıldığında hayvan hangisinin üzerinde duracaktı? Sıçanlar, fareler ve insanlar hemen her zaman, hoş bir sıcaklık hissi veren 30°C'yi tercih eder; zeminden ısıtma sisteminin verdiği rahatlığı düşünün. Fakat on üç çizgili yer sincapları açısından 20°C de 30°C kadar hoş bir sıcaklık hissi verir. Yer sincapları, sıcaklık ancak sıçanlarla farelerin acı verecek kadar soğuk bulup kaçındığı 10°C'nin altına düşerse

30°C'ye yönelir. Sıcaklık 0°C'ye düşse bile ikinci tablanın üzerinde durabilirler.

Yer sincabı, düşük sıcaklıklara bu denli tahammüllü olmasaydı kış uykusuna yatamazdı. Uyurken çok üşüdüğümüzde bizim yaptığımızı yapardı: Isı üretmek için yağ yakmaya başlar, o da yetmezse uyanırdı. Bu mekanizma bizim için hayat kurtarıcıdır. Ama bir yer sincabı için kara kışın ortasında ölümcüldür. Sincabın kış uykusuna yatması *gereklidir*, bu yüzden de duyuları kış uykusuna göre ayarlanmıştır. Yer sincabı soğuğu görmezden gelmez, sadece onun "soğuk" kavramı, yani vücudunun artık kaldıramadığı ve duyularının alarm çanlarını çaldığı en düşük sıcaklık farklıdır.

Sıcaklık, bütün canlıları derinden etkiler. Ortam fazla soğuksa kimyasal tepkimeler iyice yavaşlar ve işe yaramaz hale gelir. Fazla sıcak olduğundaysa biçimi bozulan proteinler ve diğer yaşamsal moleküller parçalanır. Bu etkiler, yaşamı belli bir sıcaklık aralığında büyük ölçüde sınırlandırır. Bu aralığın sınırları değişse de her zaman vardır; o nedenle sinir sistemi olan her hayvan bir şekilde sıcaklığı hisseder ve ona tepki verir.[6]

Hayvanlar çeşitli sıcaklık sensörleri kullanır; bu sensörlerin en iyi araştırılmış olanları, TRP* kanalları denen bir protein grubudur.[7] TRP kanalları, bütün vücuttaki duyu nöronlarının yüzeyinde bulunan, doğru sıcaklığa ulaşıldığında açılan minik kapılardır. Kanallar açılınca iyonlar nöronlara girer, elektriksel sinyaller beyne gider, biz de sıcağı ya da soğuğu hissederiz. Bazı TRP kanalları sıcağa, bazılarıysa soğuğa ayarlıdır. (Soğuk, sıcağın yokluğu değildir; başlı başına farklı bir duyudur.)† TRP kanalları farklı sıcaklıklara tepki verir: Bazıları ılık ve tehlikesiz aralıkları tespit eder, bazılarıysa tehlikeli ve acı veren uç sıcaklıklarda ateşlenir. Belli kimyasallar bu kanalları tetikleyerek ısınma ya da serinleme hissi oluşturabilir. Acı biberin yakmasının nedeni, bileşimindeki kapsaisinin acı verecek kadar yüksek sıcaklıkları algılayan

* "Transient Receptor Potential"ın [Geçici Reseptör Potansiyeli] kısaltması. (*ç.n.*)

† 1880'lerde Magnus Blix, farklı sıcaklıklarda su şişelerine bağlanmış ucu sivri bir metal boru kullanarak elinin üzerindeki belli noktaların sıcağa, belli noktalarınsa soğuğa hassas olduğunu gösterdi. Alfred Goldscheider ve Henry Donaldson da aynı dönemde, birbirlerinden bağımsız olarak aynı keşfi yapmışlardı.

bir TRP kanalı olan TRPV1'i tetiklemesidir.* Nane serinlik hissi verir çünkü içerdiği mentol, soğuk sensörü olan TRPM8'i etkinleştirir.

Aynı sensörler bütün hayvanlar âleminde bulunur ama her türün kendi vücuduna ve yaşam tarzına göre az çok farklılık gösterir. Sıcakkanlı hayvanlar kendi vücut ısılarını üretir; onların soğuk sensörü olan TRPM8, vücut sıcaklığı dar bir konfor aralığının altına inmeye başlayınca uyarı verir. Sıçanda bu nokta 24°C civarındadır.[8] Vücudu biraz daha yüksek bir sıcaklıkta işleyişini sürdüren tavuktaysa 29°C'ye ayarlanmıştır. Ortamın sıcaklığına bel bağlayan soğukkanlı hayvanların vücut sıcaklıklarıysa aksine geniş bir aralıkta dalgalanır. Dolayısıyla onların TRPM8'leri çok daha düşük bir sıcaklığa, örneğin kurbağalarda 14°C'ye ayarlıdır. Göründüğü kadarıyla balıklarda TRPM8 yoktur ve balıkların çoğu donma noktasına yakın sıcaklıklara dayanabilir.[9] Ağrı hissedebilseler bile anlaşılan acıdan kıvranacak kadar üşümenin nasıl bir şey olduğu hakkında hiçbir fikirleri yoktur. Her insanın kendini rahat hissettiği sıcaklık farklı olabilir ama hayvanlar âleminin bütününde bu değişkenlik daha da fazladır.

Peki ya yer sincapları? Matos-Cruz, onlardaki TRPM8 çeşidinin diğer sıcakkanlı kemirgenlerdekine çok benzediğini ama sensörün, duyarlılığını bir hayli azaltan birkaç mutasyon geçirmiş olduğunu keşfetti.[10] Sensör mentole hâlâ yanıt vermekle birlikte 10°C'nin altındaki sıcaklıklara zar zor tepki verir. Bu, bize dayanılmayacak kadar soğuk gelen koşullarda yer sincaplarının nasıl bu denli rahat kış uykusuna yatabildiğini kısmen açıklar.†

Ağrı uyandıracak kadar yüksek sıcaklığı saptayan TRPV1 sensörü de sahibinin ihtiyaçlarına, özellikle de vücut sıcaklığına göre ayarlanmıştır.[12] Tavuklarda 45°C, farelerde ve insanlarda 42°C, kurbağalarda 38°C ve zebra balıklarında (soğuk sensörü işine yaramasa da sıcak

---

* Yaygın inanışın aksine, bunun tat duyusuyla bir ilgisi yoktur. Bir keresinde habanero biberi doğradıktan sonra banyo yapmış biri olarak şunu söyleyebilirim: Ellerinize ve vücudunuzun diğer hassas yerlerine yeterince kapsaisin bulaşırsa dokunduğunuz her yerin cayır cayır yandığını hissedersiniz.

† İnsan TRPM8'inin yüksek enlemlerde daha sık görülen bir çeşidi, soğuk iklimlere adaptasyonu yansıtıyor olabilir.[11] Sensörün bu çeşidini taşıyanların soğuğu farklı algılayıp algılamadığını bilmiyoruz.

sensöründen fayda gördüğü açıktır) 33°C'de etkinleşir. Her türün sıcak tanımı kendine özgüdür. Bizim yaşadığımız sıcaklık zebra balığına acı verir. Bir farenin can çekişmeye başladığı sıcaklık tavuğu rahatsız etmez. Hatta tavuklar bile şimdiye dek sınanmış hayvanlar içinde sıcağa karşı duyarlılığı en düşük TRPV1'in bulunduğu ve bu sayede diğer canlıların dayanamayacağı sıcaklıklar karşısında bana mısın demeyen iki türün gölgesinde kalır. Bunlardan biri, tam da beklendiği gibi çölde yaşayan çift hörgüçlü devedir. İkincisiyse hiç de beklenmediğimiz –ve işte huzurlarınızda– on üç çizgili yer sincabıdır! Elimdeki bu kendi halinde kemirgen sadece dondurucu soğuğa değil, aşırı sıcağa da dayanabiliyor. Gracheva'nın ısıtıcı tablayla yaptığı testlerde sincaplar, üzerinde durdukları tabla ancak kavuracak kadar ısınıp 55°C'ye ulaştığında daha soğuk olan plakaya koşmuşlardı.[13] Bu hayvanların ABD'deki yaşam alanının kuzeyde Minnesota'dan güneyde Teksas'a kadar uzanmasına şaşmamalı. Sıcaklık sensörleri coğrafi dağılım sınırlarını, aktif oldukları mevsimleri ve başka pek çok şeyi etkiler. Bu sensörler, hayvanların hem hissedebildiği ve tahammül edebildiği sıcaklıkları tanımlayarak hem de "sıcak" ve "soğuk" için bireysel sınırların ince ayarını yaparak, nerede, ne zaman ve nasıl yaşayacaklarını belirler.

Bunlar uç koşullarda sürdürülen yaşamlar olabilir. Sahra gümüş karıncası, yeryüzünün en büyük çölünde, öğle saatlerinde sıcaklığı 53°C'ye varan kumların üzerinde yiyecek arar; denizin altındaki yanardağ bacalarının yakınında yaşayan Pompei solucanıysa benzer sıcaklıklara kısa süreliğine dayanabilir.[14] Kar sinekleri −6°C'de aktifken, buz solucanları bütün yaşamını buzullar üstünde geçirir ve elinize alırsanız her iki hayvan da ölür.[15] Ekstremofiller olarak adlandırılan bu hayvanları inceleyen biliminsanları genellikle ısıyı yansıtan kıllar ya da kanlarındaki antifriz madde gibi adaptasyonlara odaklanır. Ancak hayvanın duyusal sistemi sürekli alarm verip ağrı hissini (ya da nosisepsiyonu) tetikleseydi bu adaptasyonlar hiçbir işe yaramazdı. Sahra çölünde, okyanusun dibinde ya da bir buzulun üzerinde yaşamanın en iyi yolu, duyuları ortamdan *hoşlanacak* şekilde değiştirmektir.

Bu kavram sezgiseldir ve Antarktika'nın soğuğuna göğüs geren imparator penguenlerden kavurucu kumların üzerinde dolaşan develere uzanan ekstremofilleri seyrederken, bu hayvanların yaşam boyu acı

çektiğini düşünmeden edemezsiniz. Onlara yalnızca fizyolojik dayanıklılıklarından değil, *psikolojik* açıdan gösterdikleri metanetten ötürü de hayran oluruz. Kendi duyularımızı onlara yansıtır, biz rahatsız olacağımız için onların da rahatsız olduğunu varsayarız. Fakat duyular, hayvanların yaşadığı sıcaklıklara göre ayarlanmıştır. Bir deve muhtemelen kızgın güneşten rahatsız olmaz, penguenler de kutup fırtınasında birbirlerine sokulurken rahattır. Fırtınalar kopsa bile soğuk onlara vız gelir.

Evimdeki termostat 21°C'yi gösteriyor ama sıcaklık evin her yerinde aynı değil. Güneye bakan ve diğer odalara göre epeyce sıcak oturma odasında çalışıyorum. Odaya vuran güneş başımı ısıtıyor, ayaklarımsa masanın altında üşüyor. Sıcaklıklardaki bu değişkenlik küçük ölçekli de olabilir: Cildimin 5 milimetre üzerinde hava 10°C daha serin olabilir; o nedenle koluma konan bir sineğin bacaklarıyla kanatlarının algıladığı sıcaklıklar da çok farklı olabilir.[16] Sinek küçük olduğundan bulunduğu ortamın sıcaklığından çok çabuk etkilenir. Başıma konarsa vücudunu birkaç saniye içinde ısıtan güneşin etkisiyle zarar görebilir.[17] Neyse ki antenlerinin ucundaki sensörler sayesinde bu olasılık çok düşüktür.

Nörobilimci Marco Gallio, dörde bölüp farklı derecelerde ısıttığı odalara koyduğu meyve sineklerinde bu sensörlerin ne kadar iyi çalıştığını gösterdi; bu deney aslında Matos-Cruz'un yer sincapları ve ısıtıcı tablayla yaptığı deneyin aynısıydı.[18] Gallio, sineklerin bayıldığı 25°C'deki hava boşluklarında rahatlıkla kalabildiğini, buna karşılık hazzetmedikleri 30°C ya da ölümcül olan 40°C'deki komşu bölgelerden uzak durduklarını gösterdi. Dahası, inanılmaz derecede hızlı karar verebiliyorlardı. Sıcak bölgenin kenarına değer dermez, görünmez bir duvara toslamışçasına havada derhal U dönüşü yapıyorlardı.

Antenlerini oluşturan kitinin ısıyı çok iyi iletmesi ve antenlerin çok küçük olması sineğin böyle manevralar yapmasını mümkün kılar. Antenler çevreyle o kadar hızlı dengeye girer ki sinek fazla sıcak ya da fazla soğuk bir alana girme gafletinde bulunduğunu hemen anlar. Gallio, bir köpeğin kokuları izlemek için burun deliklerini kullanmasına benzer şekilde, sineğin de antenlerini ısı gradyanlarını izleyen çifte

termometreler olarak kullandığını keşfetti. Sinek, antenleri arasındaki 0,1°C'lik sıcaklık farkını dahi anlayabilir ve bu karşılaştırmalara göre konfor sıcaklığına yönelir. Gallio bu sonuçları anlattıktan sonra, gördüğüm her sineğin hareketlerine farklı gözle bakmaya başladım. Daha öncesinde gözüme hep son derece gelişigüzel ve kaotik görünen rotalarının artık bir amacı varmış gibi görünüyordu; böcek sanki benim sezemediğim, önemsemediğim ve beceriksizce ilerlediğim bir parkurda, soğuk ya da sıcak engellerin arasından geçerek yolunu buluyordu.

Sineğin, termotaksi olarak adlandırılan bu yeteneği hayvanlar âleminde yaygındır.* Büyük küçük pek çok hayvan, termosensörlerini kullanarak bulunduğu ortamın sıcaklığının dayanılmaz hale geldiğini anlayabilir ve hareket ederken çevresindeki sıcaklıkta meydana gelen değişimleri ölçebilir. Çoğu hayvan, saklanmış bir nesneyi bulmak için sıcak-soğuk oyunu oynayan çocuklar gibi, güneş ışınlarının ve gölgelerin, esintilerin ve akımların yarattığı ısı gradyanlarını takip etmek için ortam sıcaklığındaki değişimlerden faydalanır. Fakat bazıları, yaygın bu yeteneği nadir bir özelliğe dönüştürmüştür. B noktasının A'dan daha sıcak olduğunu, oraya gitmeden anlayabilirler. Uzaktan algıladıkları ısı kaynaklarını aktif olarak arayabilirler.

10 Ağustos 1925 günü, sabah 11.20'de, Kaliforniya'nın Coalinga şehrindeki bir petrol deposuna yıldırım düştü.[23] Yıldırımın başlattığı yangın üç gün sürdü. Yükselen alevler karanlığı öyle aydınlatıyordu ki 15 kilometre uzakta yaşayanlar bile geceleri okuyabiliyordu. Gece okuyanlar, o sırada dalga dalga yükselen dumanlara karşı uçarak cehennem ateşine doğru yol alan minik siyah benekleri fark etmişlerdir belki. Bu benekler, ismiyle müsemma yangın böcekleriydi.

---

* Minicik larvalardan tutun, dokuz metre uzunluğundaki köpekbalıklarına kadar varan balıklar, suyun daha sıcak olduğu yüzeye yükselerek ya da daha serin olduğu derinlere dalarak vücut sıcaklıklarını kontrol ederler.[19] Deniz tabanından çok sıcak volkanik sıvıların fışkırdığı hidrotermal menfezlerde yaşayan kükürt solucanları, fokurdayan suyun içinde daha serin cepler bulabilir.[20] Uçma kaslarını güneşte ısıtan kelebekler, kanatlarındaki sensörler aşırı ısındıklarına dair uyarı verince güneşlenmeyi bırakır.[21] Denizkaplumbağası embriyoları, güneşlenmek için yumurtanın daha sıcak olan tarafına dönerek termotaksi davranışı sergileyebilir.[22]

Güveler, alevlerin cazibesine kapılmalarıyla meşhurdur ama onları çeken şey aslında ışıktır.* Oysa yangın böceği de denen *Melanophila*'yı sıcak çeker. Bir santimetreden biraz daha uzun bu siyah böceklerin izabelerde, çimento fabrikalarının ocaklarında ve şeker rafinerilerindeki sıcak şurup varillerinde, entomolog Earle Gordon Linsley'nin ifadesiyle "inanılmaz sayılara" ulaşabildiği keşfedildi.[24] Bir yaz günü Linsley, bu böceklerin "çok miktarda geyik etinin piştiği" barbekülere doğru sürü halinde uçtuğunu görmüş.[25] Linsley, 1940'larda Berkeley'de, Kaliforniya Memorial Stadyumu'nda bu böceklerin, futbol hayranlarını "giysilerinin üstüne konarak, hatta ellerini ve enselerini ısırarak" rahatsız ettiğini yazmıştı. Muhtemelen "Havanın durgun olduğu günlerde stadyumun üstünde bazen bir pus tabakası oluşturan yirmi bin civarında sigaranın dumanı bu kınkanatlıları oraya çekiyordu." Verdiğim örnekler, her iki tür için de talihsiz karşılaşmalardır çünkü sanayi tesisleri, barbeküler ve futbol stadyumları, gerçek hedefi orman yangınları olan bu böcekleri yolundan saptıran dikkat dağıtıcılardır.

Yangın yerine varan kınkanatlılar, hayvanlar âleminin belki de en çarpıcı seks eylemini gerçekleştirerek yanan ormanın ortasında çiftleşir.[26] Dişiler yumurtalarını kömürleşip soğuyan ağaç kabuklarına bırakır. Odun yiyen larvalar yumurtadan çıktığında cennete düşmüş gibidirler. Kendilerini larvalara karşı savunamayacak kadar fazla hasar görmüş ağaçları büyük bir iştahla yerler. Korlardan ve küllerden yükselen duman ve ısı, yırtıcıların larvaları yemesini engeller. Larvalar huzur içinde serpilip olgunlaşır ve sonunda kendi alevlerini aramak için uçar. Fakat orman yangınları nadir ve öngörülemezdir; ayrıca böceklerin yangını uzaktan saptayabilmesi gerekir. Gündüz aktif oldukları için gececil böceklerin tersine alevleri kolayca fark edemezler. Gözleri muhtemelen dumanları bulutlardan ayırt edebilecek kadar keskin olmadığından görme duyularına güvenemezler. Antenleri kavrulmuş ağaç kokusunu saptayabilir elbette ama rüzgârın yönü bu ipuçlarını fazlasıyla etkiler.[27] Yangın böcekleri için en güvenilir ipucu ısıdır.

* Kelebeklerin kanatlarında ısı sensörleri bulunduğunu gösteren Naomi Pierce, güvelerin mum alevinin sadece ışığına çekildiğine ikna olmuş değil. Meslektaşı Nanfang Yu'yla birlikte yıllardır, güve antenlerinin kızılötesi dedektör olarak iş görüp görmediğini araştırıyorlar.

Cisimlerin atomları ve molekülleri sürekli titreşir ve bu hareket elektromanyetik radyasyon üretir.[28] Cisim ısındıkça molekülleri daha hızlı hareket eder ve daha yüksek frekanslarda daha fazla radyasyon yayar. Bu radyasyon kısmen görünür ışığı da içerir (ısıtılınca akkor haline gelen metali düşünün) ama büyük bölümü kızılötesi spektruma dahildir.* Kızılötesi ışığı göremesek de hissedebiliriz. Önünde durduğunuz bir şöminede yanan odun kızılötesi ışık yayar. Size ulaşan bu ışığın enerjisi emilerek şömineye en yakın durduğunuz yeri ısıtır ve cildinizdeki sıcaklık sensörlerini harekete geçirir. Böylece ısıyı hissedersiniz. Isının nereden geldiğini de anlayabilirsiniz çünkü vücudunuzun kızılötesi ışığa maruz kalan kısımları ısındığı halde, gölgede kalan kısımları ısınmaz. Ancak bu etki kısa menzillidir. Kızılötesi ışık şömineden her yöne yayılır ve bir kısmı yol alırken soğurulur. Yanan kütüklerle aranızdaki mesafe arttıkça size ulaşan ışık miktarı azalır ve ışığın ilettiği enerji bir noktadan sonra vücudunuzu dikkate değer ölçüde ısıtmaz. Uzak bir kaynaktan yayılan kızılötesi ışığı saptayabilmeniz için ya kaynak son derece güçlü (güneşte olduğu gibi) ya da sizin özel bir donanımınız olmalıdır. *Melanophila* işte böyle bir donanıma sahiptir.

Bu böceklerin kanatlarının altında, orta ayaklarının hemen arkasında bir çift minik çukur bulunur. Bu çukurlardan her birinde 70 kürecikten oluşmuş, biçimsiz bir ahududuyu andıran bir küme yer alır. Zoolog Helmut Schmitz bu kürecikleri mikroskopla incelediğinde her birinin sıvıyla dolu olduğunu ve basınca duyarlı bir nöronun ucunu sardığını gördü.[29] Kızılötesi ışınlar çarpınca küreciklerin içindeki sıvı ısınır ve genleşir. Dış çeperi sert olduğundan dışarı doğru şişemeyen kürecikler, sinirleri sıkıştırarak nöronların ateşlenmesine neden olur. Bu, daha önce gördüğümüzden farklı bir ısı algılama mekanizmasıdır.

* Kızılötesi ışık çok geniş bir dalgaboyu aralığını kapsar; öyle ki bu aralığın bir kol boyu olduğunu varsayarsak görünür ışık spektrumu bir saç telinden daha kalın olmayacaktır. Birinci Bölüm'de gördüğümüz göçmen somon balıkları gibi bazı hayvanlar ya da gece görüş gözlüğü takan insanlar en kısa dalgaboylu kızılötesi (yakın kızılötesi) ışınlarını görebilir. Bu sensörler orta dalga kızılötesi ışınları algılayamaz; bunlar ısıya güdümlü füzelerin algıladığı, orman yangınlarının yaydığı ve yangın böceklerinin peşine düştüğü dalgaboylarıdır. Isınan cisimlerse uzak kızılötesi ışınlar yayar. Termal kameralar ve çıngıraklıyılanlar bu dalgaboylarını saptar.

Kış uykusuna yatan yer sincapları ya da vızıldayan meyve sineklerinin tersine, bu kınkanatlılar ortamın sıcaklığını ölçmekle kalmaz. Bizim şöminenin önünde ısınırken yaptığımız gibi, sıcak kaynaklardan kızılötesi ışık şeklinde yayılan radyan ısıyı algılarlar.

Çoğu zaman onlarca kilometre ötedeki orman yangınlarına ve başka sıcak yerlere gittiklerine göre bu böceklerin küresel sensörleri olağanüstü duyarlı olmalı. Ağaçsız, kurak bir arazinin göbeğinde yer alan Coalinga petrol deposuna 1925'te yıldırım düşmüştü. Oraya giden kınkanatlıların çoğu, muhtemelen bölgenin 130 kilometre kadar doğusundaki ormanlardan yola çıkmıştı. Schmitz bu mesafeye ve 1925'teki yangının simülasyonlarına dayanarak böceklerdeki minik çukurların, ticari kızılötesi dedektörlerin çoğundan daha duyarlı olduğunu ve önce sıvı azotla soğutulması gereken teknoloji harikası kuantum dedektörleriyle aynı kulvarda yer aldığını hesaplamış.[30] Schmitz, çukurcukların kendi başına bu denli duyarlı olamayacağını düşünüyor. Böcekler onları daha hassas hale getirmenin bir yolunu bulmuş olmalı.

Uçma sırasında kanat hareketlerinin oluşturduğu titreşimler, kanadın altındaki çukurcuklara ulaşıp küresel sensörleri sarsar ve duyu nöronlarını ateşlenme sınırına getirir.[31] Nöronları bu sınırdan aşırmak için artık çok daha düşük düzeyde kızılötesi radyasyon yeterlidir. Dar yüzeyi üzerinde duran bir tuğla düşünün. Bir sinek çarpsaydı tuğla yerinden oynamazdı. Ama kenarı üzerinde dengede duruyor olsaydı bir sinek bile o tuğlanın dengesini bozabilirdi. Bu durumda tuğla çok az miktarda enerjiye tepki vermeye hazırdır. Schmitz'e göre kanat hareketleri de ısı sensörlerini benzer şekilde hazırlayarak yangın böceğinin, normalde çok zayıf kızılötesi radyasyon kaynaklarını saptayabilmesini sağlıyor. Bir ağacın üzerindeki yangın böceği nispeten duyarsızdır. Ama yangın yerini aramak için havalandığı andan itibaren arama alanı kendiliğinden genişler ve uzaktaki ısı kaynağının zayıf izleri bile pırıl pırıl bir işaret fişeğine dönüşür.*

* Bu şimdilik bir spekülasyondan ibaret. Schmitz'in bunu kanıtlamak için böceğin nöronlarındaki elektrik sinyallerini kaydetmesi ve bunu yaparken sensörlerin bulunduğu çukurcuklardan hiç ısı kaybı olmaması gerekiyor. Ayrıca kanat çırpmayla ilgili teorisi doğru çıkarsa aynı testi uçan bir böcekte tekrarlamak zorunda. "Çok zor," diyor ama öyle demesi bile işin zorluğunu anlatmaya yetmez.

Bu kınkanatlının bir başka önemli özelliği daha var. Diğer böceklerde olduğu gibi vücudunun dış yüzeyi ateşin yaydığı kızılötesi radyasyonu çok iyi soğurur. Yangın böcekleri, yangın kovalamayı sağlayacak adaptasyonlara zaten sahipti. Atalarının tek yapması gereken, doğalında soğurdukları kızılötesi ışığı anlamlandırabilecek bir sensör geliştirmekti. On bir *Melanophila* türünün tamamı bunu yaptı ve o kadar başarılı oldular ki beş kıtaya yayıldılar.[32] Fakat Avustralya'ya ulaşamadılar. Orada üç farklı böcek türü birbirinden bağımsız olarak, kömürleşmiş bir orman cennetinin sükûnetinden sonuna kadar istifade etmelerini sağlayan kızılötesi sensörler geliştirdi. Yangın kovalama o kadar işe yarar bir numaraydı ki evrim boyunca en az dört kez ortaya çıktı. Kaldı ki bir hayvanın izini sürmek isteyeceği tek ısı kaynağı yangın değildir. Bazı türler vücut ısısının peşindedir.

"İçeri kesinlikle giremezsin," diyor Astra Bryant. Çaresiz boyun eğiyorum ve Bryant soğuk odanın altını üstüne getirirken dışarıda bekliyorum. Birkaç dakika sonra elindeki pipette 5 mikrolitre berrak sıvıyla dışarı çıkıyor. Pipetteki sıvı o kadar az ki onu zar zor görebiliyorum. İçinde yüzen binlerce nematodu (yuvarlak solucan) kesinlikle göremiyorum.

Nematodlar, en fazla tür içeren ve en çok çeşitlilik gösteren hayvan gruplarından biridir; on binlerce yuvarlak solucan türünün çoğu insana zarar vermez. Bryant'ın tuttuğu pipetteki, iplik kurdu da denen *Strongyloides stercoralis* istisnalardan biridir.[33] Dışkı bulaşmış suda ve toprakta bol miktarda larva bulunur. Talihsiz bir insan böyle bir yerde durur ya da yürürse kurtlar ona doğru yüzer ve derisinden içeri girer. Kancalı kurtlar ve iplik kurtları gibi cildi delip vücuda girebilen diğer nematodlar, Vietnam'dan Alabama'ya, bütün dünyada 800 milyon civarında insanı enfekte eder. Mide-bağırsak sisteminde sorunlara, gelişme geriliğine ve bazen de ölüme yol açarlar. Bu hastalıkların tedavisi çok zordur. Bryant ve hocası Elissa Hallem, enfeksiyonları önlemenin yeni yollarını bulmak için bu kurtların konaklarını nasıl bulduğunu anlamaya çalışıyorlar. Kokular elbette denklemin önemli bir parçası. Isı da öyle.[34]

Bryant canavarlarla dolu pipeti, kapısında biyolojik tehlike işaret olan, çelikten yapılmış bir odaya götürüyor. İçeride, sağ tarafı oda sıcaklığında,

sol tarafıysa insan vücudu sıcaklığında olacak şekilde asimetrik ısıtılmış, yarı saydam bir jel tabakası var. Bryant pipeti jelin ortasına sıkıyor; nematodlar, yanımızdaki ekranda beyaz noktalardan oluşmuş bir halka şeklinde beliriyor. Noktalar korkunç bir aceleyle hareket etmeye başlıyor. Halka çabucak uzayıp bir bulut biçimini alıyor ve ısının olduğu tarafa, sola doğru sürükleniyor. Daha doğrusu yaklaşıyor. Topu topu bir iki milimetre uzunluğundaki solucan, boyunun yüzlerce katı kadar bir mesafeyi aşıyor. Milyonlarca insanı nasıl enfekte edebildiğini anlamaya başlıyorum. Üç dakika içinde hepsi jelin sol kenarına toplanmış, algıladığı ama bulamadığı ısının kaynağını araştırıyor. "İlk gördüğümde *ağzım açık kalmıştı*," diyor, o zamanlar solucanların dakikalar içinde katettikleri mesafe için saatler harcamalarını beklemiş olan Bryant. "Bu filmi konuşmalarım sırasında gösterdiğimde izleyicilerden genellikle iniltiler yükseliyor."

Asalaklık tüyler ürpertici olabilir ama doğada en sık görülen yaşam biçimlerinden biridir. Hayvan türlerinin büyük çoğunluğunun, diğer canlıların vücutlarından faydalanarak hayatta kalan asalaklar olması muhtemel.[35] Bu beleşçilerin birçoğu konak seçimi konusunda titiz davranır ve doğru hedefi bulmaları gerekir. Kokular iyi ipucu verir. Ama yüz milyonlarca yıl önce başka bir olasılık daha ortaya çıkmıştı.

Kuşların atalarıyla memelilerin ataları, vücut sıcaklığını ortam sıcaklığına bağlı olmaktan kurtarıp kendi vücut ısısını üretme ve kontrol etme yetisini birbirlerinden bağımsız olarak geliştirmişti. Teknik adıyla endotermi, günlük konuşma dilinde sıcakkanlılık olarak bildiğimiz bu özellik, kuşlarla memelilere hız ve dayanma gücü, mukavemet ve imkân bahşetti. Uç koşullarda yaşamalarına, uzun süre ve uzun mesafeler boyunca aktif kalmalarına olanak tanıdı. Aynı zamanda da onları çok kolay izlenebilir kıldı. Asalakların konaklarını ve özellikle de kan damarlarını bulmasını sağlayan sabit vücut sıcaklığı, bu hayvanları sürekli parlayan işaret fişeklerine dönüştürdü. Ne de olsa kan, besin maddelerinden zengin, dengeli ve genellikle steril olan mükemmel bir gıdadır. En az 14 bin hayvan türünün kanla beslenecek şekilde evrilmesi ve birçoğunun –tahtakuruları, sivrisinekler, çeçe sinekleri ve suikastçı böcekler– ısıya hassas olması sürpriz değil.[36]

Memeliler içinde yalnızca üç vampir yarasa türü sadece kanla beslenir. Bunlardan ikisi kuşları, yaygın vampir yarasa türüyse memelileri,



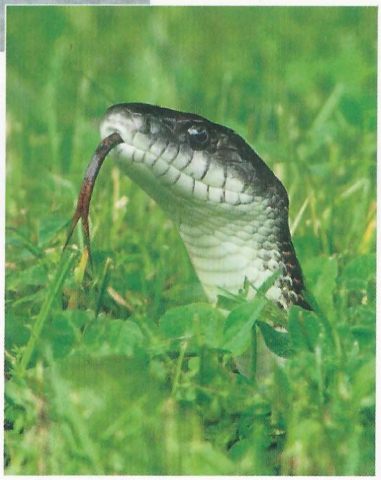
Köpeğin burun deliklerindeki yana bakan yarıklar, nefes verirken daha fazla koku alabilmesini sağlar.



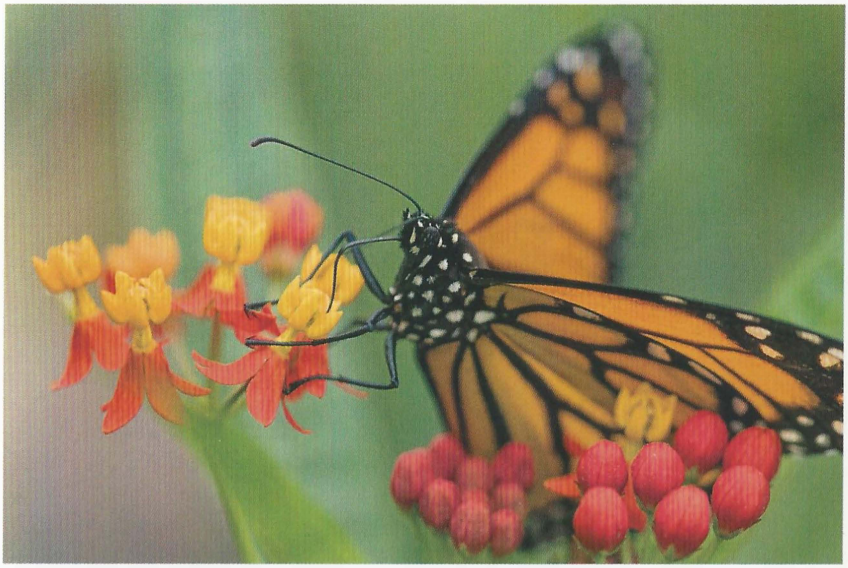
Kolayca izleyebilmek için boyayla işaretlenmiş klonal akıncı karıncalar.



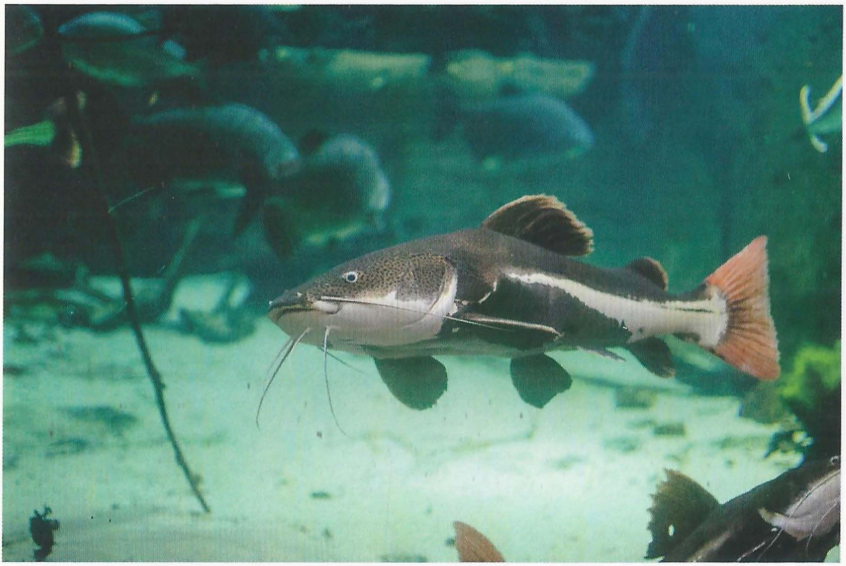




Koku organları, filin hortumu, albatrosun gagası ve yılanın çatallı dili gibi çeşitli biçimlerde karşımıza çıkar.



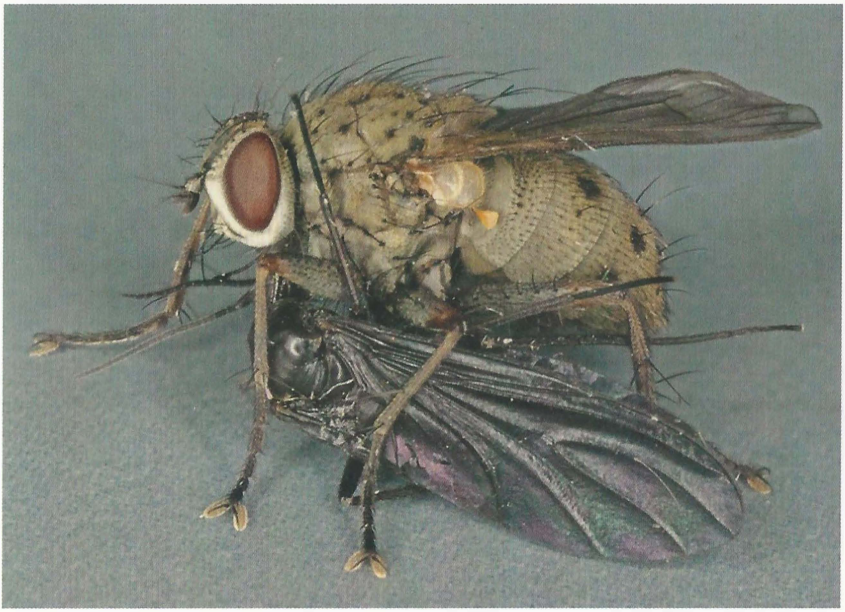
Kelebekler ve diğer böcekler, ayaklarındaki reseptörler sayesinde, üzerinde durdukları şeylerin tadına bakabilir.



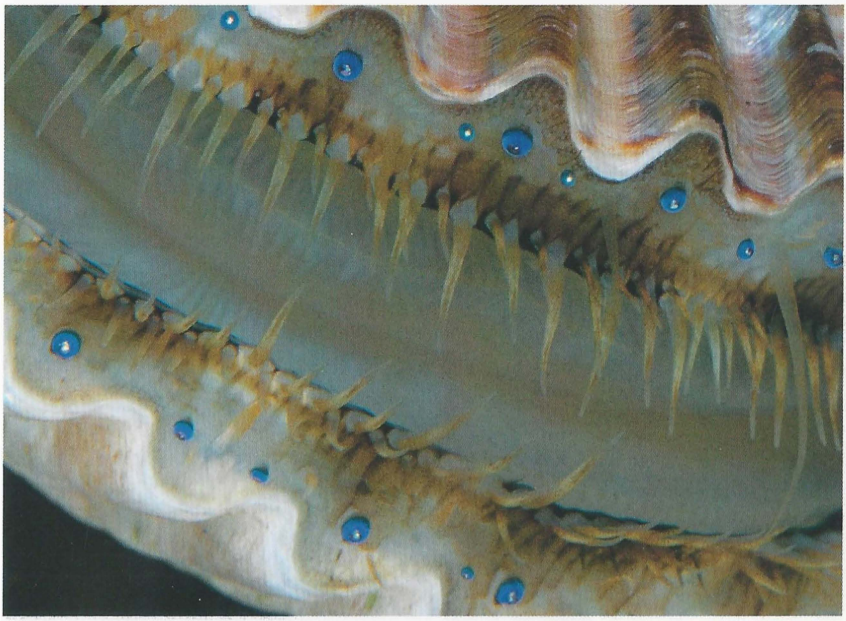
Derisi tepeden tırnağa tat tomurcuklarıyla kaplı olan yayınbalığı yüzen bir dil gibidir.



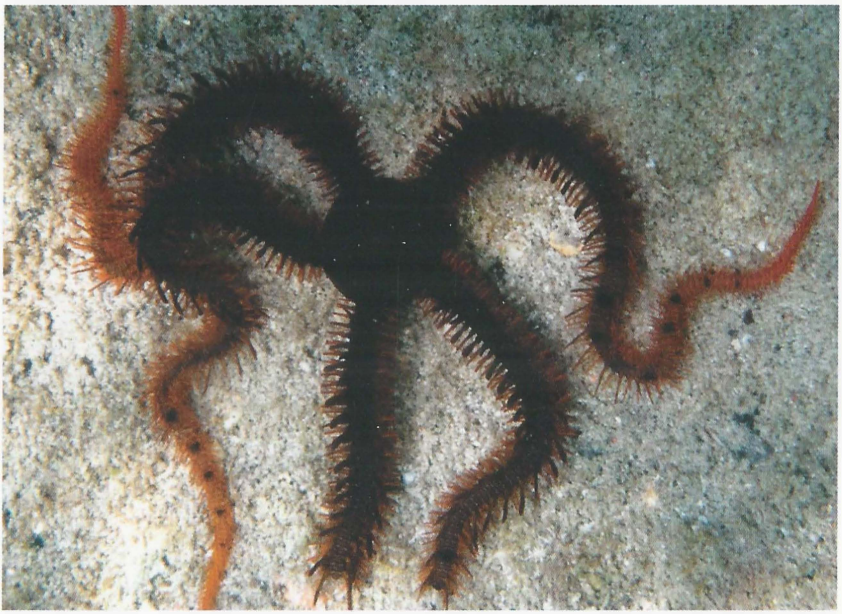
Sıçrayan örümceğin merkezî gözleri keskin görüşe sahipken, yanlardaki göz çifti hareketleri izler.



Katil sinek son derece hızlı olan görüşü sayesinde süratli uçan böcekleri göz açıp kapayıncaya kadar yakalar.



Körfez deniztarağında kabuğun kenarı boyunca onlarca mavi göz bulunur.

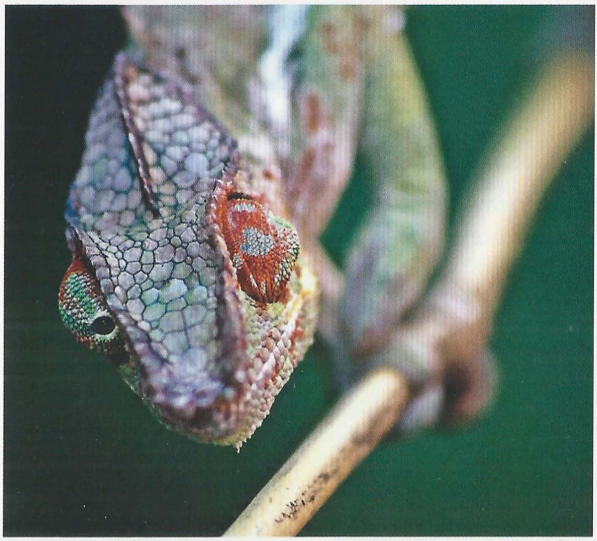


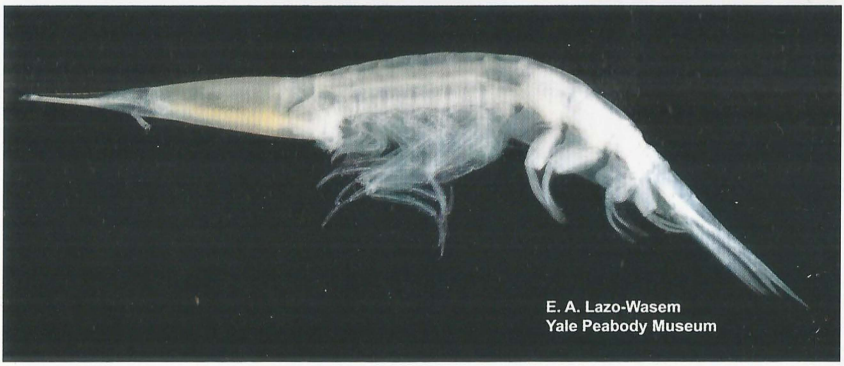
Gündüzleri yılanyıldızının tüm vücudu bir göz gibi davranır.



Erkek mayıssineğinde gözün devasa üst kısmı gelip geçen dişileri fark etmesini sağlar.

Bukalemun birbirinden bağımsız çalışan gözleriyle aynı anda hem öne hem de arkaya bakabilir.





Gözleri kaynaşarak tek bir silindire dönüşmüş olan Streetsia challengeri *yukarıyı, aşağıyı ve yanları görebilir ama önünü göremez.*



Bu gececil ter arısı, burnunuzun dibini dahi göremeyeceğiniz zifirî karanlıkta bile ormandaki küçük yuvasını bulabilir.



Fil atmaca güvesi, yıldızların loş ışığında bile çiçeklerin renklerini görebilir.

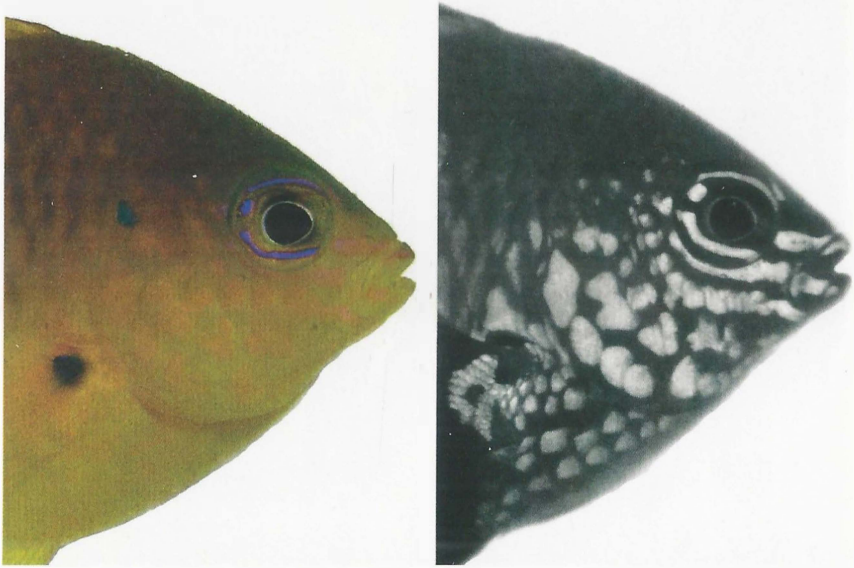


Çoğu insanın trikromatik görüşü ile köpeklerin dikromatik görüşü arasındaki farkı gösteren bu fotoğraflarda, Korgi ırkından, çok iyi bir köpek olan Typo modellik yaptı.





Çiçeklerin üzerindeki işaretler ve ambon damsel balığının yüzündeki şeritler gibi birçok doğal desen sadece ultraviyole ışığında görülebilir.



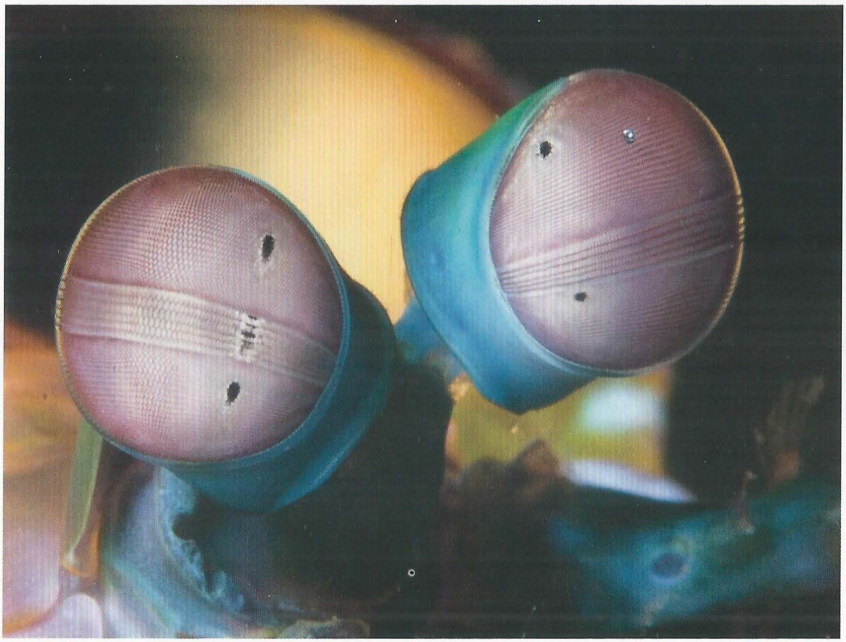


Geniş kuyruklu sinekkuşunun boğazı ve Heliconius erato *kelebeklerinin kanat desenleri, insanların algılayamadığı ultraviyole renkleri yansıtır.*





Tavuskuşu mantis karidesleri, üç bölümlü gözlerinin orta bandını kullanarak renkleri diğer hayvanlardan bambaşka biçimde görür.







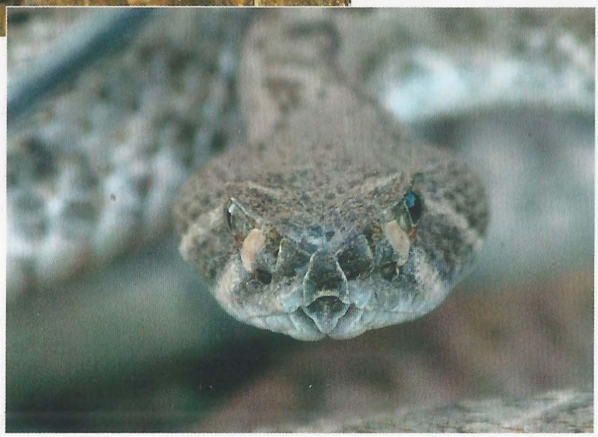
Çıplak kör fare, asitlerin ve acı biberdeki yakıcı kapsaisinin neden olduğu acıya karşı duyarsızdır.

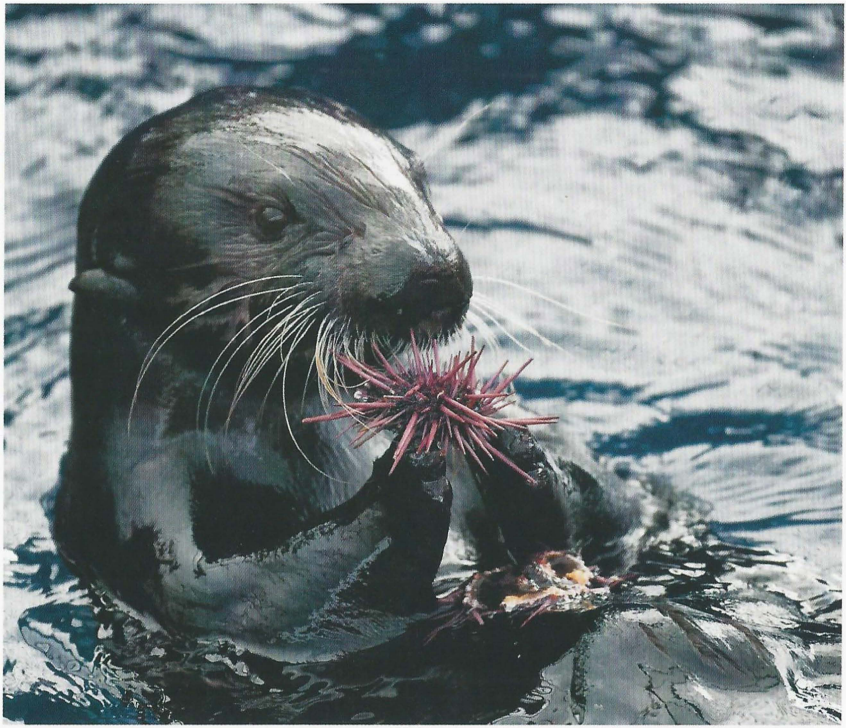
On üç çizgili yer sincabı, bizde ağrı uyandıran soğuğa karşı duyarsız olduğundan kış boyunca uykuya yatabilir.





Bu hayvanlar, sıcak cisimlerden yayılan kızılötesi radyasyonu algılayabilir. Yangın böcekleri bu özellikleri sayesinde yanan ormanları bulur, vampir yarasalar ve çıngıraklıyılanlarsa sıcakkanlı avlarının izini sürer.

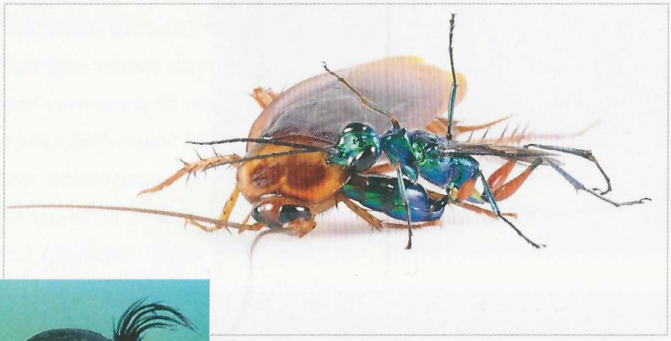




Deniz samurları, avlarını göremediklerinde hassas elleriyle yoklayarak hisseder; büyük kumkuşlarıysa gagalarını kuma sokarak aynı şeyi yapar.







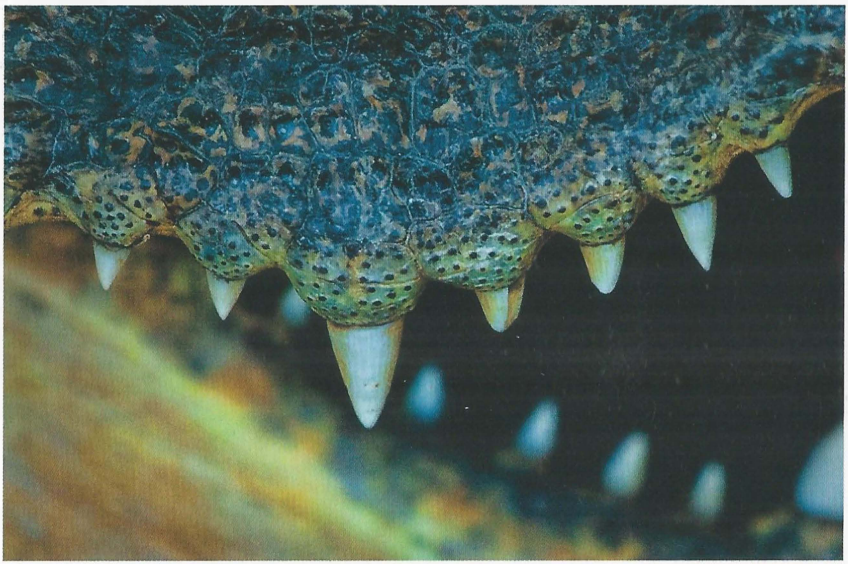


Dokunma organları, yıldız burunlu köstebeğin burnu, mücevher eşekarısının iğnesi, bıyıklı alkletin yüzündeki tüyler ve farenin bıyıkları gibi pek çok farklı biçimde karşımıza çıkabilir.





Manatiler, dokunmaya karşı aşırı hassas olan dudaklarıyla cisimleri evirip çevirir ve birbirlerini selamlar.



Timsahın burnundaki kabartılar, avının suda yarattığı en hafif dalgalanmaları bile saptayabilir.

özellikle de inek ve domuz gibi büyük türleri hedef alır. Burun-kuyruk arası uzunluğu 7,5 santimetre civarında olan bu küçük yarasa, "pug" ırkı köpekler gibi yassı burunludur. Yerdeyken kanatlarını geriye doğru katlayan hayvan dört ayak üstünde yayılarak durur. Bu şekilde yaklaştığı hedefinin ya doğrudan sırtına biner ya da yakınına inip hiç de yarasavari olmayan bir tarzda üstüne tırmanır. Jilet gibi keskin dişleriyle hiç acıtmadan küçük bir kesik açar ve akan kanı yalaya yalaya içer. Tükürüğündeki drakulin adlı bileşik, kanın pıhtılaşmasını engelleyerek yarasanın bir saat kadar beslenebilmesini sağlar. Kendi ağırlığı kadar kan içebilir ve hayatta kalabilmek için bunu her gece bir kez yapmak zorundadır. Diğer duyuları bir hedefi uzaktan izleyebilmesine yardım eder ama aradaki mesafe 15 santimetreye indiğinde ısırabileceği iyi bir yer bulmak için termal duyusunu kullanır.

Vampir yarasanın ısı sensörleri, yarım daire şeklindeki bir yastığın üzerinde kalp biçiminde bir deri kıvrımı içeren burnunda yer alır.[37] Bu tabakaların arasında, ısı algılayan nöronlarla dolu milimetrik boyutlarda üçlü çukurlar bulunur. Vampir yarasalar sıcakkanlı oldukları için kızılötesini algılayan diğer hayvanlardan farklı olarak kendine has bir sorunla karşılaşır. Hayvanın kendi vücut ısısının, çukurlardaki nöronları şaşırtması gerekir ama yoğun bir doku ağının yaptığı yalıtım bu nöronları, yarasa yüzünün geri kalanından 9°C daha serin tutar.

Elena Gracheva, sevimli yer sincapları üzerinde çalışmaya başlamadan önce bu nöronları araştırıyordu.[38] Venezuela'daki meslektaşları, mağaralara gidip kendi atlarını yarasaları oltaya getirmek için yem olarak kullandılar; yarasaların nöronlarını çıkarıp doku örneklerini ABD'deki Gracheva'ya gönderdiler. Örnekleri analiz eden Gracheva, çukur nöronların, TRPV1'in (bu bölümde daha önce gördüğümüz, genellikle ağrı uyandıran ısıyı ve biber acısını saptayan sıcaklık sensörü) özel bir çeşidiyle dolu olduğunu gösterdi. TRPV1, bulunduğu hayvan türünde ağrı uyandıran farklı sıcaklıklara (soğukkanlı olan zebra balığında 33°C'ye, sıcakkanlı olan fare ve insanda 42°C) göre kalibre edilmiştir. Vampir yarasada TRPV1'in kalibrasyonu, çukur nöronlardaki sensörler dışında, tipik bir memelininki gibidir; çukur nöronlarsa çok daha düşük sıcaklıkta, 31°C'de ateşlenir. Yarasa, aşırı yüksek ısıyı saptayan bu sensörü, vücut ısısını saptayacak şekilde yeniden ayarlamıştır.

Keneler de kan emer ama onların ısı sensörleri birinci bacak çiftinin ucundadır. Kene bu bacakları sağa sola sallayarak, arayış olarak adlandırılan davranışı sergilerken, bir şey yakalamayı bekliyormuş gibi görünür. Gerçekten de bekler ama aynı zamanda hisseder. Umwelt kavramının isim babası Jakob von Uexküll, kenenin konağını koku duyusuyla aradığını ve sıcaklıktan yalnızca çıplak deri üzerinde olup olmadığını kontrol etmek için faydalandığını yazmıştı. Fakat bu doğru değil. Ann Carr ve Vincent Salgado bir süre önce, kenelerin vücut ısısını dört metre mesafeden saptayabildiğini keşfettiler.[39] Daha da şaşırtıcısı, iki araştırmacı, DEET ve sitronella gibi sık kullanılan kenesavarların, kenenin koku duyusunu rahatsız etmeyip ısı takibini engellediğini gösterdi. Bu keşif sayesinde kene ısırıklarını önlemenin yeni yollarını bulabiliriz ama biliminsanları da kenelerle ilgili önceden yapılmış çalışmaları yeniden değerlendirmek zorunda kalabilir. Araştırmacılar bir kenenin Umwelt'ini doğru tahayyül edemediği için daha önce kimbilir kaç deney yanlış yorumlandı?

Geriye dönüp bakınca, kenenin termal duyusunun çok önceden anlaşılmış olması gerektiğini görüyoruz. Arama bacaklarının ucundaki organların çoğunlukla koku dedektörü olduğu düşünülüyordu. Fakat bu yapılar da vampir yarasanın yüzündekine çok benzeyen, tabanında nöronların yer aldığı minik küresel çukurlar içerir. Bu çukurlar, üzerinde küçük bir delik bulunan ince bir tabakayla örtülüdür. Bir burun için çok kötü bir tasarımdır bu çünkü tabaka koku moleküllerinin çoğunun, altındaki nöronlara ulaşmasını engeller. Ama aynısı, *kızılötesi* sensör için mükemmel bir tasarımdır. Uzaktaki bir konağın kanından yayılan kızılötesi radyasyonun büyük bölümü bu tabaka tarafından bloke edilirken, sadece bir kısmı delikten geçip altındaki çukuru kısmen aydınlatır. Kene, hangi kısımların aydınlandığını çözümleyerek radyasyonun yönünü ve kaynağın nerede olduğunu saptayabilir. Hâlâ doğrulanması gerekse de mantıklı bir fikir bu. Ne de olsa doğadaki en karmaşık ısı sensörleri böyle çalışıyor. Onları bulmak için biraz cesarete, bir çift tozluğa ve uzun bir sopaya ihtiyacımız var.

Julia'yı bulamıyoruz. Tam önümüzde, frenkincirinin dibindeki sıçan deliğinde pusuya yatmış beklediğini biliyoruz ama onu göremiyoruz.

Antenlerimiz vericiden gelen radyo sinyalini alırken Julia'nın orada olduğunu gösteren güçlü biplemeyi duyabiliyoruz ama Julia'nın kendisi sessiz. Kuyruğu bile çıngırdamıyor. Onu kendi haline bırakıp başka bir yılan aramaya koyuluyoruz.

Eşim Liz Neeley ile Kaliforniya'da, ABD Donanması'na ait çitlerle çevrili çalılık arazide yılan aramaya geldik. Çocukluğunu yılan ve kertenkele peşinde koşarak geçirmiş ve bundan hiç vazgeçmemiş olan Rulon Clark ile öğrencisi Nate Redetzke bize rehberlik ediyorlar. Redetzke'nin civardaki yılanların yerlerini düzenli olarak yeniden tespit etmesi gerekiyor; o nedenle birçok yılana radyo vericisi yerleştirmiş. İsmiyle müsemma toprak bir yol olan Rattlesnake Canyon Road [Çıngıraklıyılan Kanyon Yolu] üzerinde park edip Kevlar tozluklarımızı giydikten sonra rezene kokan havayı içimize çeke çeke, zehirli sarmaşıklardan sakınarak kayaların üzerinden tırmanıyor, adaçayı çalılarının arasında ilerliyoruz.

"Sürüngenlerle çalışınca insan sıcaklığa ve hava koşullarına karşı çok hassaslaşıyor," diyor Clark. Sıcaklığın mevsim normallerinin üstünde olmasını beklediğimiz bu ekim günü Clark, çıngıraklıyılanların açık arazide güneşleneceği umuduyla bizi sabah erkenden keşif gezisine çıkardı. Ama hava durumu tahmininin tersine hava soğuk ve bulutlu. O nedenle biz dışarıdayız ama yılanlar ortalıkta görünmüyor. Powers bir kaktüsün arasında gizleniyor. Truman kayaların arasında bir yerlerde. Julia ortalarda yok. (Redetzke yılanlara eski başkanların ve eşlerinin adlarını vermiş.) Tam pes etmek üzereyken Redetzke güçlü bir bipleme duyuyor, bir anda canlanıyor ve yamacın etrafına doğru seğirtiyor. Az sonra bize sesleniyor; Margaret'ı bulmuş. Bir çalının dallarını aralıyor, elindeki maşayla uzanıp bir metre uzunluğunda, pas rengi bir Kuzey Pasifik çıngıraklıyılanı [*red diamond rattlesnake*] çıkarıyor. Bu yılanlar sözde uysaldır ama onların bile sınırları var. Redetzke, Margaret'ı torbaya koyarken yılan hamle yapıyor ve kumaşın üzerinde sarı zehir damlaları bırakıyor. Torbaya giren yılan kuyruğunu çıngırdatıyor ama bedeni soğuk ve boğuk bir ses çıkarıyor.

Redetzke daha sonra Margaret'ı, gövdesinden biraz daha geniş bir plastik boruya sokuyor. Bir uçtan kuyruğunu nazikçe kavrayıp diğer uçtan yüzüne bakıyorum. Gözbebekleri dikey birer yarık şeklinde. Ağzı

yukarı doğru kıvrık olduğundan sırıtıyormuş gibi görünüyor. Göz kapağı olmayan gözlerinin üstündeki büyük yatay pullar hayvana, ters ters bakan engerek yüzü dediğim öfkeli bir ifade veriyor. Bu görüntü normalde insanın içine korku salar. Ama ben onun güzel buluyorum. Kimbilir o benim için ne düşünüyor? Bu mesafeden beni görebildiği kesin ve bunun için gözlerini kullanmakla yetinmiyor. Burun deliklerinin hemen ardındaki bir çift küçük çukur sayesinde, sıcak yüzümden ve daha az oranda giysilerin altındaki vücudumdan yayılan kızılötesi radyasyonu saptayabiliyor. Sabah serinliğinde pırıl pırıl parlıyor olmalıyım.

Isıya duyarlı çukurlar, üç yılan grubunda birbirinden bağımsız olarak evrildi.[40] Bunlardan ikisi –pitonlar ve boa yılanları– kurbanını sarılıp sıkıştırarak boğan, zehirsiz, konstriktör yılanlardır.* Üçüncü grupsa son derece zehirli ve ismiyle müsemma çukur engerekleridir; su mokasenleri [*cottonmouths*], bakır kafalı yılan [*copperheads*], mokasen yılanları [*mocassins*] ve çıngıraklıyılanlar bu grupta yer alır.† Çıngıraklıyılanlar sıcak nesnelere saldırır, yeni ölmüş fareyi uzun süre beklemiş olana tercih eder ve zifiri karanlıkta bile saldırsa isabet ettirir.[43] Gözleri olmayan, doğuştan kör bir çıngıraklıyılan bile, fare öldürmede gözleri gören bir yılan kadar başarılıydı.[44] Çukur organları sayesinde, hedef aldığı kemirgenlere isabet ettirmekle kalmayıp özellikle kafalarına saldırıyordu.

Çukur engereğinin termal duyarlılığı, kenenin bacaklarındakine benzeyen çukur organların yapısından kaynaklanır. Bu organların

---

* Boa yılanlarıyla pitonların çukur organları bazı açılardan çukur engereklerininkinden çok farklıdır. Bu yılanlarda çukurdaki zar asılı olmayıp duyarlılığı daha azdır. Başın ön kısmındaki bir çift çukur organı yerine, iki yanında çok sayıda çukur organı bulunur; George Bakken bu yapıyı böceklerin bileşik gözlerine benzetir. Bununla birlikte Elena Gracheva her üç grupta da aynı ısı sensörünün (TRPA1) bulunduğunu saptadı.[41]

† Yılanların çukur organlarını 1683'te tanımlayan ilk Batılı biliminsanı, bunların duyu organı olduğunu doğru tahmin etmiş ama kulak olduğu konusunda yanılmıştı. Bu yapıların burun delikleri, gözyaşı kanalları ya da koku, ses veya titreşim sensörleri olduğunu ileri sürenler de yanılıyordu. 1935'te Margaret Ros –yılan Margaret'la bir alakası yok– evcil pitonunun çukur organlarını vazelinle kapatarak, hayvanın sıcak nesnelere doğru sürünmesini engelleyebildiğini fark edene dek doğru cevabı bulan çıkmadı.[42] Ros, yılanın çukur organlarını, avının vücut ısınını hissetmek için kullandığı sonucuna vardı.

şeklini kafanızda canlandırabilmek için bir cam fanusun dibine minyatür bir trambolin koyup fanusu yan yatırdığınızı düşünün. Çukur organında dar bir açıklıktan, ince bir zarın gerili olduğu havayla dolu, daha geniş bir odacığa ulaşılır. Bu açıklıktan geçen kızılötesi ışınlar, üzerine düşerek zarı ısıtır. Zarın dış etkenlere açık ve havada asılı konumda bulunması, kalınlığının da bu kitabın bir sayfasının ancak altıda biri kadar olması bu süreci kolaylaştırır. Dahası zar, en ufak bir sıcaklık artışını saptayan 7 bin civarında sinir ucuyla donatılmıştır. Elena Gracheva, bu sinirlerin, yılanın vücudunun başka herhangi bir yerindeki nöronlardan 400 kat fazla TRPA1 ısı sensörü içerdiğini keşfetti. Bu sensörler, zarın sıcaklığındaki 0,001°C'lik bir artışa bile yanıt verir.[45] Bu şaşırtıcı duyarlılık sayesinde çukur engereği, bir kemirgenin sıcaklığını bir metre öteden saptayabilir.[46] Başınızın üstünde çöreklenmiş, gözü kapalı bir çıngıraklıyılan, kolunuzu öne doğru uzattığınızda, parmağınızın üzerinde duran bir farenin sıcaklığını hissedebilir.*

Çukur organı yapısal olarak göze benzer. Kızılötesi ışığı saptayan zar, retina gibidir. Işığın girmesine izin veren açıklıksa gözbebeğine benzer ve tam da bir gözbebeği gibi dar olduğundan, odacığa giren kızılötesi ışınların etkisiyle zarın bazı bölgeleri ısınırken, ışınların ulaşmadığı gölgede kalan bölgeler daha soğuk kalır. Yılan, nasıl retinasına düşen ışığı kullanarak bir görüntü oluşturabiliyorsa aynı şekilde sıcak ve soğuk alanlardan oluşan bu örüntüyü kullanarak yakındaki bir ısı kaynağının yerini saptayabilir. Bu benzetmeler birer metafordan ibaret değil. Bazı biliminsanları, çukur organlarının, gerçek gözlerin göremediği kızılötesi dalga boylarına ayarlanmış ikinci bir göz çifti olduğunu düşünüyor. Her iki organdan gelen sinyaller beynin farklı bölümleri tarafından işlendikten sonra optik tektum denen bölgeye ulaşır. İki sinyal akışı burada birleşir ve görünür spektrumla kızılötesi spektrumdan gelen enformasyon girdileri, görünüşe göre her ikisine de yanıt veren nöronların yardımıyla kaynaşır.[47] Yılanların kızılötesini gerçekten *görüyor* ve sadece başka bir renk olarak algılıyor olması mümkündür. Nörobilimci Richard Goris, bir zamanlar "Çukur organlarını bağımsız bir altıncı duyu olarak düşünmek hatadır," diye yazmıştı. "Yaptıkları şey, sahiplerine daha iyi

* Sakın bunu evde denemeye kalkışmayın.

bir görüş kazandırmaktır."[48] Bu organlar yılanın gece daha fazla ayrıntı görmesini, bitki örtüsünün gizlediği sıcak nesneleri fark etmesini ya da dikkatini koşarak kaçan ava yöneltmesini sağlayabilir.*

Ne var ki çukur organı, olsa olsa bulanık gören çok basit bir göz olabilir. Tipik bir retinadaki milyonlarca sensöre kıyasla çukur organında sadece binlerce sensör bulunur ve gelen kızılötesi ışığı odaklayacak bir mercek yoktur. Çıngıraklıyılanların neyi nasıl gördüğünü göstermeye çalışan doğa belgesellerinde, termal kameralarla yapılan çekimler yanıltıcıdır. Kırmızı-beyaz kemirgenlerin mavi-mor arkaplanda dolaştığı o görüntüler gerçekçi olamayacak kadar çok ayrıntı içerir. Arnold Schwarzenegger'ın yırtıcı bir uzaylı yaratıkla karşı karşıya geldiği 1987 yapımı *Predator* filmi, kızılötesi görüşün bulanıklığını betimlemekte daha başarılıdır. (*Predator* belki de ilk kez bu kitapta gerçekçi olmakla itham ediliyor.)

Fizikçi George Bakken, çukur organlarının, bir kütüğün üstünde koşan fareyi nasıl algıladığını gösteren bir simülasyon hazırladı. Büyük soğuk kütlelerin üzerinde hareket eden küçük sıcak kütleler şeklinde grenli bir görüntü elde etti.[50] Başınıza çöreklenmiş gözü bağlı bir yılan, parmağınızın üstündeki fareyi saptayabilir ama fare pazı kasınıza gelene dek yılana biçimsiz bir kütle olarak görünecektir. Çukur engerekleri pusu kuracakları yeri çok dikkatli seçerek bu eksikliği telafi eder. Boynuzlu çıngıraklıyılan [*sidewinders*] yüzünü, ortam sıcaklığının hızla değiştiği ve sıcakkanlı bir hayvanın daha kolay fark edilebileceği termal kenarlara dönme eğilimindedir.[51] Çin'in Shedao Adası'nda yaşayan çukur engerekleriyse ilkbaharda büyük bir iştahla yedikleri göçmen kuşları daha kolay saptayabilmek için açık havada pusu kurarlar.[52]

---

* Bazı araştırmacılar, yer sincaplarının, çıngıraklıyılanın kızılötesi duyusunu kandırabileceğini iddia eder. Yer sincabı yılanla karşı karşıya gelince kuyruğunu kaldırır ve kan pompalayarak ısıtır.[49] Bu hamle hayvanın termal siluetini büyütür ve ısı algılayan bir yırtıcıya daha tehditkâr görünmesini sağlar. Sincapların bu yöntemi, kızılötesini algılayamayan sincap yılanına (gopher snake) değil, sadece çıngıraklıyılanlara karşı kullanması manidar olup iki farklı tür arasındaki kızılötesi iletişimin bilinen ilk örneği kabul edilmiştir. Ama Clark ve diğerleri buna ikna olmuş değil. Sincap teyakkuza geçtiği için kuyruğunu kaldırıp kan pompalıyor olabilir ve bunu sincap yılanları yerine çıngıraklıyılanlar karşısında yapmasının sebebi belki de ikincisinin daha tehlikeli olmasıdır!

Yılanlar aslında ısıyı nasıl algılar? Çinli herpetolog Yezhong Tang, kısa kuyruklu çukur engereklerini araştırırken bir ipucu yakaladı.[53] Yılanın bir gözünü ve aynı taraftaki çukur organı engellediğinde yılanın kurbanını ısırma olasılığı yüzde 86'ydı. Her iki gözü ya da her iki çukur organı engellediğinde isabet oranı yüzde 75'e düşmüştü. Fakat bir gözü ve *karşı taraftaki* çukur organı engellediğinde saldırıların sadece yüzde 50'si başarılı olmuştu. Bu beklenmedik sonuç, yılanların görsel ve kızılötesi enformasyonu bir araya getirdiğini düşündürüyor. Peki ama yılanlar, çözünürlüğü bu denli farklı iki duyuyla bunu nasıl başarıyor? Bakken, beynin, çukur organlarından aldığı kaba enformasyonu, çok daha net olan göz kaynaklı enformasyonu kullanarak daha iyi yorumlamayı öğrenip öğrenmediğini merak ediyor. Sonuçta biz de yapay zekâyı yeterince büyük bir görüntü kümesiyle eğiterek resimleri sınıflandırması ya da gizli örüntüleri bulması için programlayabiliyoruz. Belki yılanın gözleri de beynine, çukur organlarından gelen bulanık enformasyonu yorumlayabilmesi için gereken görüntü kümesini temin ediyordur.

Çukur organların sağladığı avantaj her ne ise önemli olmalı. Çukur organı zarındaki sinirlerde bulunan, mitokondri dediğimiz minik akülerin sayısı, tipik duyu organlarındakinden çok daha fazladır. Bu da kızılötesi duyunun çok fazla enerji gerektirdiğini düşündürür; o halde bu bedele değecek bir fayda sağlaması beklenir. Çukur engereklerine, çukur organı olmayan yılanlar karşısında kesinlikle üstünlük sağlar.* Fakat Clark'a kızılötesi duyuyla ilgili ne kadar çok soru sorarsam o kadar çok yanıtsız

* İsrail'de yaşayan Burt Kotler, çukur organı olan boynuzlu çıngıraklıyılanlar ile Orta Asya'da yaşayan ve kızılötesi duyunun bulunmaması dışında çıngıraklıyılanlara çok benzeyen boynuzlu engerekleri karşılaştırarak bunu gösterdi.[55] Kotler her iki yılanı da etrafı çevrili, geniş, açık alanlara yerleştirdi. Çukur organı olmayan boynuzlu engerekler, ay ışığının olmadığı gecelerde daha pasif davrandı; buna karşılık boynuzlu çıngıraklıyılanlar karanlıkta da ısıyı kullanarak avlanmaya devam etti. Dahası, İsrail'in yerel kemirgenleri, yerel bir tür olan boynuzlu engereklere kıyasla yabancı bir tür olan boynuzlu çıngıraklıyılanlara daha büyük bir tehditmiş gibi davrandı. Kotler, çukur organları "kısıtlamayı yıkan bir adaptasyon" olarak tanımlıyor; en loş ışıkta bile avlanmaya olanak tanıyan bu yenilik, yılanların etkili yırtıcılığın bir üst düzeyine geçmesini sağlar.

soruyla baş başa kalıyorum.* Çukur engereklerinin çoğunda gece görüşü mükemmel olduğu halde niye bu organlar evrildi? Kızılötesi duyu görmeyi destekliyorsa neden diğer gececil engereklerde de evrilmedi? Kobralar ve garter yılanları gibi çok daha yakın akrabaları dururken, niye engereklerden evrim sürecinde 90 milyon yıl önce ayrılmış ve çok farklı biçimlerde avlanan pitonlar ile boa yılanlarında aynı özellik gelişti? Ve en şaşırtıcı olanı, çukur organların göründüğü kadarıyla soğukken daha iyi çalışmasının sebebi nedir?† "Bir şeyi gözden kaçırıyor olmalıyız," diyor Clark. "Kızılötesi duyu, avı hedef almakla ilgili olabilir ama bence yılanlar onu bizim anlamadığımız biçimlerde kullanıyor."

Başka bir hayvanın Umwelt'ini anlamak için davranışlarını izlemelisiniz. Ancak bir çukur engereği çoğu zaman beklemekten başka bir şey yapmaz. Kendi vücut ısısını üretmediğinden aylarca hiçbir şeye yemeden pusuya yatıp doğru anın gelmesini bekleyebilir. Bu hayvanları araştıracak

---

* Clark'ın öğrencisi Hannes Schraft, doğal ortamında araştırdığı çukur engereklerinde şaşırtıcı sonuçlar elde etti. Boynuzlu çıngıraklıyılanlar geceleri, kumdan biraz daha sıcak olan ve parlak işaretler gibi görünen çalıların arasında pusuya yatar. Fakat Schraft, gözü bağlı boynuzlu çıngıraklıyılanların etrafta kararsızca dolanıp durduğunu ve çalıları bir türlü bulamadığını gördü.[56] Ayrıca daha soğuk, dolayısıyla daha yavaş hedefler nispeten kolay yakalanabileceğine göre, yılanların, kızılötesi görüşten faydalanarak avın vücut sıcaklığını ölçüp ölçmediğini merak etti. Bunu yapmazlar. Nitekim yılanlar, Schraft'ın verdiği, sıcak su torbasıyla ısıtılmış ölü kertenkelelere ilgi göstermemişti.[57]

† Viviana Cadena 2013'te, çıngıraklıyılanların kontrollü biçimde nefes vererek çukur organları aktif olarak soğutup vücut sıcaklığının birkaç derece altında tutabildiğini keşfetti.[58] Birkaç yıl sonra Clark ve Bakken, farklı sıcaklıklarda tuttukları çıngıraklıyılanların, nispeten soğuk bir zeminde hareket eden sıcak bir sarkacın yerini saptama becerisini ölçtüler. İlginçtir ki yılanlar, vücut sıcaklıkları ne kadar düşük olursa sarkacı o kadar iyi takip edebiliyordu. "Küçük dilimizi yutmuştuk," diyor Bakken. Eğer ana ısı sensörü daha yüksek sıcaklıklarda daha iyi çalışması gereken $TRPA_1$ ise bu modelin bir anlamı kalmaz. Soğukkanlı hayvanların ısındıkça daha etkin olması gerekir; model bu nedenle de mantıklı değil. Çıngıraklıyılan ısındıkça daha hızlı ve aktif bir avcıya dönüşüyorsa avlanırken kullandığı ana duyulardan birinin duyarlılığı nasıl olur da azalır? "Bir terslik var ve bunu nasıl yorumlayacağımı henüz bilmiyorum," diyor Clark. Bakken ve Clark, sonuçlarını umut verici bir akademik dobralıkla, "Nispeten Soğuk Yılanlar Kızılötesi Uyaranlara Daha Güçlü Tepki Veriyor Ama Sebebi Hakkında Hiçbir Fikrimiz Yok" başlıklı makalelerinde yayımladılar.[59]

kadar cesur az sayıda araştırmacı, karşısında çoğunlukla hiçbir şey yapmadan yatan yılanlar bulur; o nedenle bu yılanları eğitmek ve anlamak çok zordur. Öte yandan, anladığımız ve nasıl eğiteceğimizi bildiğimiz hayvanların bile ısıyı nasıl algıladığını açıklamakta zorlanıyoruz.

Zoolog Ronald Kröger, Kevin adlı golden retriever'ı aldıktan sonra köpeğin burnuna merak sardı. Köpekler uyurken burunları genellikle daha sıcak olur. Ama uyandıktan kısa bir süre sonra burunlarının ucu ıslanır ve soğur. Kröger, sıcak bir odadaki bir köpeğin burnunun, ortam sıcaklığından yaklaşık 5°C, aynı ortamdaki bir ineğin ya da domuzun burnuna göre 9°C ila 17°C soğuk olduğunu buldu.[60] Neden? Gerek vampir yarasalar gerekse çıngıraklıyılanlar anlaşıldığı üzere ısıya hassas çukur organları soğutur. Köpekler de aynısını yapıyor olabilir mi? Köpeğin burnu, koku organı olmanın yanı sıra bir kızılötesi sensör de olabilir mi?

Kröger kesinlikle öyle olduğunu düşünüyor. Kröger'in ekibi, Kevin, Delfi ve Charlie adlı üç köpeği, görünümü ve kokusu aynı ama sıcaklıkları 11°C farklı iki panel arasındaki farkı anlayacak şekilde eğitti.[61] Eğiticilerin doğru yanıtı bilmediği ve bu nedenle köpekleri istemeden de olsa etkileyemeyeceği çift kör testlerde, üç köpek yüzde 68-80 oranında doğru paneli seçti. Ekibin ileri sürdüğü görüşe göre, büyük bir avdan yayılan kızılötesi radyasyonu saptamak, evcil köpeklerin atası olan kurtların işine yaramış olabilir. Fakat kızılötesi radyasyon, mesafe arttıkça hızla zayıfladığına göre, zaten keskin bir işitme ve koku duyusuna sahip bu hayvanlara nasıl bir fayda sağlamış olabilir? Kurt hiç kuşkusuz, burnu avın sıcaklığı hakkında ipucu vermeden çok önce avının kokusunu alabilir. Yakın mesafelerdeyse gözleri ve kulakları, kızılötesini algılayan bir burnun yardımı olmadan da koşan bir hedefin izini hiç şüphesiz sürebilir. "Bunun nasıl bir fayda sağlamış olduğunu hayal etmek zor," diyor çalışmadaki araştırmacılardan Anna Bálint. "Sanırım alışılmış kalıpların dışında düşünmeliyiz."

Başka bir Umwelt'i düşünürken mesafe her zaman önemlidir. Doğru koşullarda koku ve görme geniş ölçeklerde çalışır. Kızılötesi duyular, orman yangınını saptamak üzere evrilmediyse daha kısa mesafelerde çalışır. Ama bazı duyular daha da samimi ve temas düzeyinde yakın olmayı gerektirir.

6.

Kaba Bir Duyu

Temas ve Akış

Başlangıçta herkes Selka'nın uyuduğunu düşünüyordu. Ergen bir deniz samuru olan Selka, Santa Cruz'da, Long Marine Laboratuvarı'nda, bir havuzun ve su yüzeyinin hemen üzerinde bir fiberglas masanın bulunduğu, etrafı çevrili bir alanda yaşıyor. Burnunu masanın altındaki daracık hava boşluğuna sokarak yüzmeye ve kestirmeye başlamıştı ya da öyle görünüyordu. Selka'nın, o şekerlemeler arasında masanın bacaklarını sabitleyen somunları yavaş yavaş söktüğü anlaşıldı. Selka'yla çalışan duyu biyoloğu Sarah Strobel bir gün platformun yana kaykıldığını fark etti. Somunlar ile cıvataları gidere sokuşturan Selka, yerinden söktüğü bacağı kucaklamış, yüzüyordu.

Deniz samurları, fotoğrafların hemen hepsinde çoğunlukla suda sırtüstü yatmış, bazen de ellerini kavuşturmuş uyurken görünür. Bu görüntü onların miskin ve sakin olduğuna dair çok yanlış bir izlenim verir. Aslında "gerçekten de kıpır kıpırdırlar," diyor Strobel. "Sürekli bir şey yapar, bir şeylerle oynar, bir şeylere dokunmak isterler." Bu delidolu halleri diğer sansargillerde de (gelincikler, ferretler, porsuklar, bal porsukları ve kutup porsuklarının dahil olduğu memeli grubu) görülen ortak bir özelliktir. Fakat deniz samurlarında Strobel'ın "sansargil karizması" dediği şey, iri bir vücut (90-150 cm uzunluğundaki bu hayvanlar grubun en iri üyesidir) ve olağanüstü becerikli ellerle bir araya gelir. Sonuç olarak, esaret altında tutulmaları oldukça

zordur.* "Acayip yıkıcıdırlar," diyor Strobel. "Çok meraklıdırlar ve bu merakı göstermenin yolu bellidir: *Ne yapsam da şunu kırıp içinde ne olduğunu görsem?*"

Meraklı olma, el becerisi ve parçalara ayırma tutkusu: Bu üç özellik, Kuzey Amerika'nın batı kıyısındaki doğal yaşam alanında deniz samurlarının çok işine yarar. Çoğu zaman soğuk olan bu sular, büyük bir sansargil olmasına karşılık alışılmadık ölçüde küçük bir deniz memelisi olan deniz samurunu zorlar. Deniz samurlarının ne ısıyı tutan iri bir gövdesi vardır ne de foklarda, balinalarda ve manatilerde bulunan yalıtkan yağ dokusu. Ne var ki deniz samurları, hayvanlar âleminde kürk kılları en yoğun canlıdır; bu hayvanların kürkünde santimetrekare başına, saçlı derimizdekinden daha fazla kıl düşer.[2] Ama bu bile vücutlarının hızla ısı kaybetmesini engellemeye yetmez. Vücut ısılarını koruyabilmek için her gün kütlelerinin dörtte biri kadar besin tüketmeleri gerekir; o nedenle hummalı bir telaş içindedirler.[3] Gece gündüz durmadan suya dalarlar.[4] Menülerinde hemen her şey bulunur ve hemen her şeyi pençeleriyle kavrarlar. Etrafı görmek için yeterli ışık olmasa bile pençeleri onları yiyeceğe yönlendirir. Doğada yaşayan deniz samurları, Selka'nın masayı parçalarken gösterdiği hüneri, balık tutmak, denizkestanesi yakalamak, kuma gömülü istiridyeleri çıkarmak için kullanır. Hassas dokunma duyuları, büyük ve soğuk okyanusta, küçük ve sıcakkanlı bir memeli olarak yaşamalarına olanak tanır.

Pençelerinin duyarlılığı beyinlerinde açıkça izlenir.[5] Diğer türlerde de olduğu gibi somatosensoriyel korteks denen bölge dokunma

* Bir haftalıkken mahsur kalmış halde bulunan öksüz Selka, 2012'de kurtarılıp Monterey Bay Akvaryumu'na getirildi ve buradaki deniz samurlarından biri tarafından büyütüldü.[1] Aylarca samurluk yapmayı öğrendikten sonra serbest bırakıldı ama sekiz hafta sonra bir köpekbalığının hunhar saldırısına uğradı. Akvaryuma geri getirildi, yaraları tedavi edildikten sonra tekrar serbest bırakıldı. Fakat yediği deniz kabukluları nedeniyle geçirdiği zehirlenme ve insanlara fazla alıştığına dair belirtiler göstermesi nedeniyle ABD Balık ve Yaban Hayatı Hizmetleri, Selka'nın "insanlarla etkileşime girme olasılığının doğadaki güvenliğini tehlikeye attığına" karar verdi. Long Marine Laboratuvarı'nda iki yıl geçirdikten sonra nihayet Monterey Bay Akvaryumu'na geri dönen Selka şimdi oradaki diğer öksüz yavrulara annelik yapıyor.

duyusuyla ilgilidir. Somatosensoriyel korteksin farklı bölümleri, vücudun farklı yerlerinden gelen girdileri alır ve bu bölümlerin nispi büyüklüğü, hayvanın başlıca dokunma organlarına dair dolaylı yoldan ipucu verebilir.[6] İnsanlarda en büyük bölümler ellere, dudaklara ve üreme organlarına ayrılmıştır. Farelerde bıyıklar, ornitorenklerde gaga, çıplak kör farelerdeyse dişler önemli yer tutar. Deniz samurlarında, somatosensoriyel korteksin pençelerden sinyal alan kısmı, diğer sansargillerdekine, hatta diğer samurlardakine kıyasla orantısız derecede büyüktür.

Oysaki bu pençeler hassas ellere benzemez. Hatta ele bile benzemezler. Derinin dokusu karnabahar yüzeyi gibidir; parmaklar birbirinden tam ayrılmamıştır. Pençeyi tuttuğunuzda altında kıpırdayan parmakları hissedersiniz ama baktığınızda Strobel'ın ifadesiyle "yün eldivenli yumru yumru" eller görürsünüz. Strobel, bu eldivenlerin neler yapabildiğini görmek için Selka'yı sınavdan geçirdi.[7] Ona, ince aralıklı yükseltilerle kaplı plastik bir levhanın dokusunu tanımayı öğretti. Sonrasında Selka'ya düşen, o levhayı, birazcık daha dar ya da birbirinden biraz daha ayrı yükseltilerle kaplı diğer levhalardan ayırt etmekti. Selka her seferinde, hatta yükseltiler arasındaki mesafe çeyrek milimetre kadar farklı olduğunda bile bunu başardı. Pençeleri gerçekten de beyninin düşündürdüğü kadar hassastı.

Ne var ki bir duyuyu değerlendirirken göz önüne alınan tek ölçü duyarlılık değildir. Birinci Bölüm'de gördüğümüz gibi, hem insanlar hem de köpekler çikolata kokulu iplerin izini sürebilir. Ancak ilk tür, bu görevi yavaş yavaş ifa ederken ikincisi aynı şeyi hızlı ve emin adımlarla yapar. Benzer şekilde Strobel, insanların dokuları elleriyle deniz samurları kadar hassas biçimde ayırt edebildiğini ama samurların insanlara göre çok daha hızlı olduğunu keşfetti.[8*] Strobel'ın deneyinde insan denekler, parmaklarını iki levha üzerinde defalarca gezdirdikten sonra doğru levhanın hangisi olduğuna karar verebilmişti. Selka ise elini üzerine koyar koymaz doğru levhanın hangisi olduğunu bilmiş, hatta diğer levhaya dokunma zahmetine bile girmemişti. Seçim yapması saniyenin beşte biri kadar sürmüştü, yani insan rakiplerinden 30 kat hızlıydı. En

* Aristoteles, "İnsan, diğer duyular bakımından birçok hayvanın gerisinde kalsa da dokunma duyusunun keskinliği bakımından hepsine fark atar," diye yazmıştı. Gerçi deniz samurlarını bilmiyordu ama iddialarında çok da haksız sayılmazdı.

yavaş karar verme süreci bile en hızlı insanınkinden hızlıydı. "Yaptıkları her şeyden çok eminler," diyor Strobel.

Diyelim ki bir deniz samuru yiyecek arıyor. Denizin yüzeyinde sırtüstü yatan samur dönüp suya dalıyor. Suyun altında sadece bir dakika kalacak, yani yaklaşık olarak siz bu paragrafı okuyuncaya kadar.[9] İniş sırasında kıymetli saniyelerini harcadığından, doğru derinliğe indiğinde samurun tereddüt edecek zamanı kalmaz. Pütürlü avuçlarıyla okyanus zeminini birkaç saniye boyunca çılgınca yoklayarak yiyecek arar. Suyun altı karanlıktır ama karanlığı dert etmez. Dünyanın en hassas pençelerine sahip hayvanlardan biri olarak dokunarak hissedeceği, tutup kavrayacağı, bastırıp dürteceği, sıkıştıracağı, okşayacağı ya da tartaklayacağı şekiller ve dokular aydınlanır. Sert kabuklu avı, kendisi kadar sert olan kayaların arasında gizlenmiştir ama samur ikisi arasındaki farkı anında anlar ve avını kayaların arasından çekip çıkarır. Dokunma duyusu, hünerli pençeleri ve sansargillere mahsus aşırı özgüveniyle o istiridyeyi, şu denizkulağını, bu denizkestanesini derken, topladığı ganimeti yemek için biz bu cümlenin sonuna gelene dek su yüzüne çıkmış olur.

Dokunma da titreşimler, akıntılar, dokular ve basınç gibi fiziksel uyaranlarla ilgili mekanik duyulardan biridir.[10] Birçok hayvanda dokunma uzaktan iş görebilir. Bu bölümde daha sonra göreceğimiz üzere balıklar, örümcekler ve manatiler gibi çeşitli canlılar havada ve suda akan, esen ve titreşen gizli sinyalleri hissedebilir. Minicik kıllar ve başka sensörler yardımıyla başka hayvanların varlığına işaret eden sinyalleri hissedebilirler. Timsahlar suyun yüzeyindeki en hafif dalgalanmayı saptayabilir, cırcırböcekleri hücum eden bir örümcekten gelen hafif esintiyi algılayabilir, foklar balıkların yüzerken geride bıraktığı görünmez akıntıların izini sürebilir. Ne var ki bu tür sinyallerin çoğu bizim için saptanabilir olmaktan uzaktır: Ancak tavandaki vantilatörün yarattığı güçlü hava akımını hissedebilirim, daha fazlasını değil. İnsanlar (ve deniz samurları) için dokunma, bir doğrudan temas duyusudur.

Parmak uçlarımız doğadaki en hassas dokunma organlarındandır. Onlar sayesinde araç gereci ince bir hassasiyetle kullanabilir, görme duyumuzu yitirdiğimizde kabarık noktalardan oluşan örüntüleri okuyabilir, ekranları üstüne basarak, dokunarak ve kaydırarak kontrol

edebiliriz. Parmak uçlarımızın duyarlılığı, hafif dokunsal uyarılmaya yanıt veren hücrelere, yani mekanoreseptörlere bağlıdır. Bu hücreler, her biri farklı bir uyaran türüne yanıt veren çeşitli reseptörler olarak karşımıza çıkar.[11] Merkel sinir uçları sürekli basınca yanıt verir: Sayfalarına bastırırken bu kitabın şeklini ve maddesel özelliklerini hissetmenizi sağlar. Ruffini sinir uçları derideki gerilme ve esnemeye yanıt verir: Tuttuğunuz cismi kavrama gücünüzü ayarlamanızı ve elinizden kayıp düşmek üzere olduğunu anlamanızı sağlar. Meissner cisimcikleri yavaş titreşimlere yanıt verir: Parmaklarınızı bir yüzeyin üzerinde gezdirirken küçük kayma ve oynamaları hissetmenizi, Braille alfabesi okuyan birininse kabarık noktaları hissetmesini sağlar. Pacini cisimcikleri daha hızlı titreşimlere yanıt verir: Daha ince dokuları değerlendirmeye ya da kılı cımbızla tutup çekerken veya toprak küreğin altında çıtırdarken olduğu gibi, nesneleri araçlar üzerinden hissetmeye yarar. Bu reseptörlerin çoğu deniz samurunun pençelerinde ya da ornitorengin burnunda da bulunur. Tatlı, ekşi, acı, tuzlu ve umami reseptörlerinin hep birlikte tat duyumuzu belirlemesine benzer şekilde, bu reseptörler de topluca dokunma duyumuzu oluşturur.

Genel anlamda bu mekanoreseptörlerin nasıl çalıştığını biliyoruz. Onca çeşitliliğe rağmen hepsi de dokunmaya duyarlı bir tür kapsülle sarılı bir sinir ucu içerir. Dokunsal uyaran, kapsülü bükerek ya da biçimini değiştirerek içindeki sinirin ateşlenmesine neden olur. Ancak bunun nasıl gerçekleştiğini hâlâ tam olarak bilmiyoruz çünkü dokunma duyusu, tüm duyularımız arasında üzerinde en az çalışılmış olandır.[12] Görme, işitme, hatta koku alma duyularına kıyasla sanata da bilime daha az ilham vermiştir. Dokunma deneyimimizde rol oynayan moleküller –görme duyusundaki opsinlerin ya da koku alma duyusundaki koku reseptörlerinin eşdeğeri– çok yakın zamana dek büyük bir sırdı. Kaba yüzeyleri hissetmemizi sağlayan dokunma duyumuz hakkında ancak kabaca bir fikrimiz var.

Ama dokunma duyusu göz ardı edilemez. Bir yakınlık ve ivedilik duyusudur; koku ya da görme duyuları kadar çeşitlidir. Hayvanlar gerek dokunma organlarının duyarlılığı gerekse onları kullanarak hissettikleri şeyler, hatta bu organların vücutta bulunduğu yerler açısından büyük farklılıklar gösterir. Dokunmanın, farklı canlıların Umwelt'lerine nasıl

bir katkısı olduğunu düşündüğümüzde kumsalları, yeraltı tünellerini, hatta iç organları bile başka türlü görmeye başlarız. *Kendi* dokunma becerilerimizin gerçek boyutu dahi kısa süre önce aydınlığa kavuştu. Bir deneyde insanlar, sadece en üstteki molekül tabakası farklı iki silisyum plakayı, her iki yüzeyin üzerinde parmaklarını gezdirerek hissettikleri minicik farklılıklar sayesinde ayırt edebilmişti.[13] Bir başka testte gönüllüler, kabartılı iki yüzeyin birbirinden farklı olduğunu, kabartılar arasında sadece *10 nanometrelik* bir yükseklik farkı olsa dahi anlamıştı;[14] bu, pütürlerinin boyutu büyük moleküller kadar olan iki zımpara kâğıdından hangisinin daha kaba pürüzlü olduğuna karar vermeye benzer.

Bu inanılmaz ustalığı mümkün kılansa harekettir.[15] Parmağınızın ucunu bir yere koyarsanız yüzeyin özellikleri hakkında ancak sınırlı bir fikir edinebilirsiniz. Ama parmağınızı hareket ettirdiğiniz anda her şey değişir. Bir kez bastırınca sert olduğunu anlarsınız. Tek bir okşama, dokuları ele verir. Yüzeyde gezinen parmaklarınız gözle görülemeyecek denli küçük tepeler ve çukurlara tekrar tekrar çarptıkça, parmak uçlarındaki mekanoreseptörlerde titreşimler oluşur. Nano ölçek düzeyinde en ince ayrıntıları bu şekilde saptayabilirsiniz.* Hareket, dokunmayı kaba bir duyudan ince bir duyuya dönüştürür. Doğadaki birçok dokunma uzmanının inanılmaz bir hızla tepki vermesine olanak tanır.

Birçok biliminsanı hayatını aynı hayvanlar üzerinde çalışmaya adar. Ken Catania bir istisna. Son otuz yılda elektrikli yılanbalıklarının, çıplak kör farelerin, timsahların, dokunaçlı yılanların, mücevher eşekarılarının ve insanların duyularını araştırmış. Tuhaflıklar ona cazip geliyor ve garip yaratıklara duyduğu ilginin karşılığını her zaman alıyor. "Genellikle, tüh, hayvan o kadar da ilginç değilmiş şeklinde sonuçlanmaz," diyor. "Hayvan genellikle hayal edebileceğimden on kat becerikli çıkar." Bunu ona en iyi belleten, üzerinde ilk çalıştığı hayvan olmuş: yıldız burunlu köstebek.

* Gönüllülerin, yüksekliği 10 nanometre farklı çıkıntıları ayırt ettiği çalışmanın yürütücüsü Mark Rutland, "parmağınız Dünya kadar büyük olsaydı evler [ile] arabalar arasındaki farkı hissedebilirdiniz," diyor.[16] Bu doğru ama gezegen büyüklüğündeki parmağınızı cadde üzerinde gezdirmeniz koşuluyla. İşin ilginç yanı bu, duyarlı parmaklarla oldukça duyarsız bir davranış sergilemek olurdu.

Yıldız burunlu köstebek, ipeksi kürkü, sıçanınkine benzer kuyruğu ve kürek gibi pençeleriyle, hamster büyüklüğünde bir hayvandır.[17] Kuzey Amerika'nın nüfusun yoğun olduğu doğu bölgelerinde yaşar, turbalıkları ve bataklıkları mesken tuttuğu ve zamanının çoğunu yeraltında geçirdiği için bu hayvanı pek az kişi görür ama görür görmez de tanır. Burnunun ucunda, burun deliklerinin etrafında halka şeklinde dizili 11 çift pembe, tüysüz, parmaksı uzantı bulunur. Başka hiçbir şeyle karıştırılamayacak kadar bariz olan ve köstebeğe adını veren bu yıldız, hayvanın yüzünde açan etli bir çiçeğe ya da belki burnunun üzerine oturtulmuş bir deniz şakayığına benzer.

Biliminsanları bu yıldızın ne işe yaradığına dair uzun zamandır tahmin yürütüyordu ama Catania 1990'larda yıldızı mikroskopla ilk incelediğinde yanıtın açık olduğunu düşünüyordu.[18] Farklı sensörlerden oluşan bir dünya görmeyi bekliyordu. Oysa Eimer organı denen ve bir böğürtlenin yüzeyini örten kubbemsi tümseklere benzer tek bir çeşit sensör gördü. Her tümsek basınca ve titreşime yanıt veren mekanoreseptörler ve oluşan sinyalleri beyne taşıyan sinir lifleri içerir. Bunların dokunma sensörleri olduğu açıktı ve yıldızın bütün yapısı bu sensörlerden oluşuyordu. Yıldız sadece ve sadece bir dokunma organıydı. Gözünüzü kısıp bakarsanız, dünyaya uzanan eller gördüğünüzü sanabilirsiniz. Gördüğünüz, az çok böyle bir şeydir zaten.*

Gözlerinizi kapayın ve ellerinizi en yakındaki yüzeylere bastırın; oturduğunuz koltuğa ya da zemine, göğsünüze ya da başınıza. Her bastırışınızda zihninizde el şeklinde bir biçim ve doku belirir. Yeterince çabuk ve sık bastırırsanız zihninizde çevrenizdeki şeylerin üç boyutlu bir modelini oluşturmaya başlarsınız. Yıldız burunlu köstebek de büyük ihtimalle böyle yapar. Karanlık yeraltı dünyasında koştururken yıldızını tünellerin duvarlarına saniyede on kez bastırır. Her bastırmayla dokulardan oluşan bir gaz ve toz bulutu içinde çevresi giderek netlik kazanır. Her bastırmayla

* Yıldızdaki uzantıların köstebeğin burnundan çıktığını zannediyor olabilirsiniz ama öyle değil. Yıldız burunlu köstebek embriyosunda, burnun yanındaki minik şişlikler uzayarak silindirlere dönüşür. Bunlar daha sonra yıldızın uzantılarını oluşturacaktır. Köstebek doğduğunda silindirler hâlâ yüzüne yapışıktır. Alttaki deri yavaş yavaş gelişerek silindirleri alttaki dokudan ayırır. Yaklaşık bir hafta sonra uzantılar ayrışıp açılır ve bir yıldız doğar.[19]

köstebeğin zihninde oluşan kesintisiz tünel modeline, âdeta noktacılık tekniğiyle yapılmış bir resimdeki gibi yeni noktalar eklenir.

Köstebeğin somatosensoriyel korteksinde (beynindeki dokunma merkezi) yıldızın tuttuğu yer, ellerimizin dokunma merkezimizde kapladığı alan gibi, haddinden fazla büyüktür.[20] Ayrıca tıpkı bizim somatosensoriyel korteksimizde her bir parmağımızı temsil eden nöron kümeleri gibi, köstebekte de yıldızın her bir uzantısına karşılık gelen nöron şeritleri bulunur. "Aslında köstebeğin beyninde yıldızı görebilirsiniz," diyor Catania.* Ama ilk keşfettiğinde bu eşlemeye bir açıdan anlam verememiş. Diğer uzantı çiftlerinden daha küçük olan 11. uzantı çiftini, beyinde yıldızın tamamına ayrılmış bölgenin neredeyse dörtte birini kaplayan koca bir nöron grubu temsil eder.[22] Köstebek, bilgi işlem gücünün en büyük bölümünü neden dokunma sensörlerinin en küçüğüne ayırsın ki?

Yüksek hızlı kameralar kullanarak köstebeği filme çeken Catania ve meslektaşı Jon Kaas, besine yıldızın ilk neresi dokunursa dokunsun, hayvanın yiyecek parçasını sonunda *illaki* en küçük 11. uzantı çiftiyle incelediğini gördüler.[23] Köstebek genellikle peş peşe, hafifçe dokunduğu nesneyi her seferinde 11. uzantı çiftine biraz daha yaklaştırır. Bu durum, gözlerimizle yaptığımız şeye çok benzer. Biz de foveamızı (retinada görmenin en keskin olduğu yer) cisimlere odaklamak için ufak tefek ayarlamalar yaparız. Benzer şekilde köstebeğin 11. uzantı çifti de Catania'nın ifadesiyle dokunsal foveadır, yani hayvanın dokunma duyusunun en keskin olduğu bölgedir. Bu bölgenin ağzın tam önünde yer alması tesadüf olamaz. Dokunduğu şeyin besin olduğunu hissettiği anda 11. uzantı çiftiyle bıraktığı lokmayı cımbız benzeri ön dişleriyle kavrar.

Köstebeğin yıldızıyla yaptığı hareket okşamak, sıvazlamak ya da dokunarak muayene etmek değildir. Basit iki hareket yapar: bastır ve çek. Hayvan belki de içe çöken ya da yönü sapan komşu Eimer organlarını karşılaştırarak avının şeklini şemailini anlıyordur. Köstebek, ölü solucan parçalarını yediği halde benzer boyutlarda lastik ve silikon parçalarına iltifat etmediğine göre, hiç şüphesiz dokuları ayırt edebilir. Dahası tüm bunları, deniz samurunu bile gölgede bırakacak kadar hızlı yapar.

* Yıldız burunlu köstebeklerin yaklaşık yüzde 5'inde, 10-12 çift uzantı içeren mutant burun görülür. Bu hayvanların beyinlerinde, uzantı sayısı kadar nöron şeridi bulunur.[21]

Yıldız burunlu köstebek camın üzerindeki bir solucan parçasını incelerken Catania'nın camın altından çektiği video kaydını izliyorum. Kayıt 50 kez yavaşlatılınca hayvanın yıldızını cama dokundurup çektiğini, lokmayı tespit ettikten sonra dokunsal foveasını yaklaştırıp kılı kırk yararak incelediğini ve sonunda parçayı yuttuğunu görebiliyorum. Gerçek zamanlı izlendiğinde neler olup bittiğini görebilmek imkânsız. Köstebek bir anda ortaya çıkar ve solucan bir anda kaybolur. Catania ve meslektaşı Fiona Remple, benzeri video kayıtlarını analiz ederek köstebeğin ortalama 230, hatta bazen 120 milisaniye kadar kısa sürede avını tanıdığını, yuttuğunu ve bir sonraki lokmayı aramaya başladığını keşfettiler.[24] Yani göz açıp kapayıncaya kadar. Yiyecek arayan bir köstebeğin yıldızıyla bir böceğe ilk olarak dokunduğu an gözünüzü kapatmaya başladığınızı farz edin. Kirpikleriniz gözünüzün orta hattını geçmeden köstebeğin beyni neye dokunduğunu algılar ve yıldızı yeniden konumlandırmasını sağlayan motor komutları gönderir. Gözünüz kapandığı anda köstebek olağanüstü hassas 11. duyarga çiftiyle böceğe ikinci kez dokunmuştur bile. Gözünüz yarı açıkken, köstebek ikinci dokunuşla gelen bilgiyi işlemden geçirip ne yapacağına karar vermiştir. Gözünüzü açtığınızda böcek ortadan kaybolmuş, köstebek bir başkasını aramaya başlamış olur.

Anlaşılan yıldız burunlu köstebek sinir sistemi elverdiği ölçüde hızlı hareket eder; tek kısıtlayıcı, yıldızıyla beyni arasındaki enformasyon akışının hızıdır. Bu da hepi topu 10 milisaniye sürer. Görsel enformasyon aynı süre içinde, bırakın beyne varmayı ya da dönüş yolculuğunu tamamlamayı, retinaya bile ulaşamaz. Işık, evrendeki en hızlı şey olabilir ama ışık *sensörlerinin* sınırı vardır ve yıldız burunlu köstebeğin dokunma duyusu yanında hepsi solda sıfır kalır. "O kadar hızlı hareket eder ki neredeyse beyninin bile önüne geçer," diyor Catania. Köstebeğin bir solucan parçasına dokunduğunu ve daha lokmayı kapıp yön değiştirmeden uzaklaşmaya başladığını gösteren başka bir video izletiyor. "Az önce neye dokunduğunu anlamadan bir sonrakinin peşine düşer," diyor Catania. Yürürken beklenmedik bir şeyle karşılaştığınızda dönüp ikinci kez bakmanın nasıl bir şey olduğunu bilirsiniz. Ama bu kolay bir harekettir; başınızı çevirmeniz yeter. Dünyayı görerek değil, dokunarak algılayan ve elleriyle değil, yüzüyle dokunan yıldız burunlu köstebek için ikinci bakış, bütün bedeni ilgilendiren hummalı bir çabadır.

Köstebeğin hızıyla duyarlılığı bağlantılıdır. Tuhaf burnuyla böcek larvası gibi küçücük bir avı bulup yakalayabilir. Fakat bu kadar minik lokmalarla hayatta kalabilmek için mümkün olduğunca çabuk ve çok yemek zorundadır. "Küçük birer elektrikli süpürgeye benzerler," diyor Catania. "Öyle ufak tefek şeyleri yerler ki niye bu zahmete girdiklerini anlayamazsınız." Bu zahmete girmelerinin sebebi, rekabete girmemeleridir. El gibi iş gören ve göz gibi tarayan yıldız burun sayesinde, yeraltı dünyası, muhteşem ayrıntılar ve rakiplerinin algılayamayacağı yiyeceklerle doludur. Başka bir köstebeğe boş bir koridor gibi görünen tünelde, yıldızın dokunduğu her yerde leziz atıştırmalıklar ışıldar.

Dokunma duyusunda özelleşmiş yıldız burunlu köstebek gibi birçok hayvan, görmenin sınırlı olduğu koşullarda yaşar. Genellikle gizli saklı ya da bulunması zor şeylerin peşinde olduklarından yoklayan, bastıran, araştıran uzuvlarla etrafı didik didik ararlar. İster deniz samurunun pençesi olsun ister insanın parmağı, filin hortumu ya da ahtapotun kolu, hayvanlar dünyayı, dokunma organlarını üzerinde gezdirerek keşfeder. Üstelik köstebeğin bize gösterdiği gibi, bu organların illaki eller olması gerekmez.

Kuşların gagaları kemikten yapılmıştır ve tırnaklarınızı da oluşturan sert keratinden bir kılıfla kaplıdır. Gagalar cansız ve hissiz görünür; yakalamak ve gagalamak için yüze monte edilmiş sert aletlere benzer. Fakat birçok kuş türünde gaganın ucu, titreşimlere ve hareketlere duyarlı az sayıda mekanoreseptör içerir. Ağırlıklı olarak görme duyusuyla yiyecek arayan tavuklarda nispeten nadir bu mekanoreseptörler sadece alt gagada birkaç küçük küme halinde bulunur.[25] Ancak yeşilbaş ve kaşıkgaga gibi bazı ördeklerde mekanoreseptörler hem alt hem de üst gaganın içine ve dışına yayılmıştır.[26] Gaganın bazı yerlerinde, parmaklarımızda olduğu gibi yoğun paketler halinde bulunur. Yeşilbaşın gagası, tırnaklarımızı oluşturan maddeyle kaplı olmakla birlikte son derece hassastır. Ördekler bu duyuyu kullanarak bulanık sularda yiyecek arar. Ördek, başı suyun altında, kuyruğu havadayken gagasını hızlı hızlı açıp kapatarak, suları sıçrata sıçrata döner durur, debelenir. Karanlık sularda hızla geçip giden iribaşları yakalayabilir, çamurun içinden yenebilir lokmaları ayıklar. Tim Birkhead, *Bird Sense* adlı kitabında, "İçine bir

avuç ince çakıl taşı eklenmiş bir kâse dolusu süt ve müsliniz olduğunu farz edin," diye yazar. "Sadece yenebilir kısımları yutmayı becerebilir misiniz? Hiç sanmam ama ördekler tam olarak böyle yapar."[27]*

Birçok kuş, gagasını karanlık girintilere sokup yiyeceği yoklayarak arar. Bu davranış özellikle sahil şeritlerinde sık görülür. En ıssız kumsallar bile kuma gizlenmiş solucanlar ve her çeşit deniz kabuklusundan oluşan gömülü hazinelerle doludur. Kervançullukları, poyrazkuşları, düdükçünler ve kumkuşları, bu saklı açık büfeye ulaşmak için gagalarıyla kumu deşer durur. Mikroskopla bakıldığında gagalarının, mısır koçanındaki gibi minik oyuklarla dolu olduğu görülür. Bu oyuklar, kuşların gömük avı bulmasını sağlayan, ellerimizdekine benzer mekanoreseptörlerle doludur.

Peki ama bir kıyı kuşu gagasıyla dürtükleyeceği yeri nereden bilir? Kumun altındaki av, dışarıdan bakıldığında kendini belli etmez; o nedenle kuşların avı gelişigüzel aradığı ve şans eseri bulduğu düşünülebilir. Fakat 1995'te Theunis Piersma, büyük kumkuşlarının deniz kabuklularını, rasgele arıyor olmaları halinde beklenenden sekiz kat sık bulduğunu gösterdi.[29] Piersma, kuşlara kovalardaki kumun içine gömülü nesneleri aramayı ve bir şey bulurlarsa önceden belirlenmiş bir yemliğe yaklaşmayı öğretti. Bu basit deney, büyük kumkuşlarının, gagalarının uzanamadığı yerlerde gömülü deniztaraklarını dahi tespit edebildiğini ortaya çıkardı.[30] Hatta taşları bile hissedebiliyorlardı; dolayısıyla koku, ses, tat, titreşim, ısı ya da elektrik alanlarına göre hareket etmedikleri açıktı. Piersma onların uzaktan çalışan, özel bir dokunma biçiminden faydalandığını düşünüyor.

Bir kumkuşu gagasını kuma sokarken, kum taneciklerinin arasındaki ince derecikleri iterek dışa doğru yayılan bir basınç dalgası oluşturur.

---

* Bazıları bu konuda özellikle iyidir. Elena Gracheva (on üç çizgili yer sincaplarını araştıran biliminsanı) ve eşi Slav Bagriantsev, yabanıl yeşilbaşları evcilleştirerek ürettiğimiz ve artık sadece besi hayvanı olarak yetiştirdiğimiz Pekin ördeklerinin dokunma uzmanı olduğunu gösterdiler. Pekin ördeğinin diğer ördeklerinkinden daha geniş olan gagası daha fazla mekanoreseptör ve bu reseptörlerden gelen sinyalleri taşıyan daha fazla nöron içerir.[28] Daha da şaşırtıcısı, ağrı ve sıcaklığı algılayan nöronları daha azdır. Duyusal yetilerin bir bedeli vardır; o nedenle yeşilbaşlar ince dokunma duyusunda ustalaşmak uğruna öbür dokunsal duyularını feda etmiştir.

Yolu üzerinde sert bir cisim, sözgelimi bir deniztarağı ya da taş varsa su bunun etrafından dolaşır ve basınç örüntüsü bozulur. Kumkuşu, gagasının ucundaki çukurcuklarla bu bozulmayı hissederek çevresindeki nesneleri, onlarla hiç temas etmeden saptayabilir. Piersma'nın "uzaktan dokunma" olarak adlandırdığı bu yeti hayli etkileyicidir ama kumkuşunun, gagasını kuma saniyede defalarca sokup çıkarmak suretiyle aynı yerleri tekrar tekrar deşmesi etkiyi daha da artırır. Bu esnada alt üst olan ve yerine otururken daha yoğun bir konfigürasyona kavuşan kum taneleri, gaganın yarattığı basıncı daha da artırır. Kumkuşu başını her eğdiğinde, işitme yerine dokumaya dayalı bir sonar kullanıyormuşçasına, çevresindeki besin daha aşikâr hale gelir.*

Mücevher eşekarısının uzun sondaj organının ucu dokunmaya duyarlıdır ama amaçları ve yöntemleri, büyük kumkuşuninkinden çok daha tüyler ürperticidir. Metalik yeşil gövdesi ve turuncu uyluklarıyla 2,5 cm uzunluğundaki bu güzel eşekarısı, yavrularını hamamböceklerinin içinde yetiştiren bir asalaktır. Dişi eşekarısı, bulduğu hamamböceğini iğnesiyle iki kez sokar. İlkinde göğsünden soktuğu hayvanın bacaklarını geçici olarak felç eder; ikincisindeyse beyninden sokar. İkinci hamle, iki nöron kümesini hedef alır ve hareket etme isteğini ortadan kaldıran zehriyle hamamböceğini itaatkâr bir zombiye dönüştürür. Eşekarısı, köpeğini dolaştıran bir insan gibi, hamamböceğini anteninden tutup yuvasına götürebilir. Yuvaya varınca yumurtalarını böceğin üstüne bırakır, böylece müstakbel larvalarına uysal ve taze et temin etmiş olur. Bu örnekte zihin kontrolü ikinci sokmayla gerçekleşir ve eşekarısının iğnesini tam doğru yere batırması gerekir. Kumun içinde bir yerde saklanan deniztarağını bulması gereken büyük kumkuşu gibi, mücevher eşekarısı da hamamböceğinin kasları ve iç organları arasındaki gizli beyni bulmak zorundadır

Neyse ki eşekarısının iğnesi yalnızca delici bir organ, zehir enjektörü ve yumurta borusu olarak değil, aynı zamanda bir duyu organı

* Piersma'nın keşfinden ilham alan Susan Cunningham, uzak akraba kuşların da uzaktan dokunma yöntemini kullandığını gösterdi. Aynak kuşları aynı tekniği orağa benzeyen uzun gagalarıyla sulak alanlardaki çamurun içinde avlanırken kullanır.[31] Yeni Zelanda'da yaşayan kiviler ise aynı şeyi yerdeki ölü yapraklar arasında yapar.

olarak iş görür. Ram Gal ve Frederic Libersat, iğne ucunun hem kokuya hem de dokunmaya duyarlı küçük girinti çıkıntılarla kaplı olduğunu gösterdiler.[32] Eşekarısı bu girinti çıkıntılar sayesinde beynin yerini saptayabilir. Eşekarıları, Gal ve Libersat'ın beynini çıkarıp kendilerine verdiği hamamböceğini defalarca sokup artık yerinde olmayan organı boş yere aramışlardı. Çıkarılan beynin yerine aynı kıvamda bir pelet koydukları zaman, eşekarıları her zamanki gibi doğru yerden sokmuştu. Pelet beyin dokusundan daha yumuşaksa kafası karışmış görünen eşekarıları hayvanı iğneleriyle delik deşik etmeye devam ediyordu. Eşekarıları beynin kıvamının neye benzediğini biliyordu.

Eşekarıları da hamamböceği kurbanları da çoğu böcek gibi çevrelerini antenleriyle dokunarak hisseder.* Geniş bir alanı tarayan bu uzun dokunma organları yön bulmada o kadar yararlıdır ki birçok türde kendine has anten biçimleri birbirinden bağımsız olarak evrilmiştir.† Alet kullanan tür olarak bilinen insan, bastonla yeri yoklayarak önünde ne var ne yok hisseder. Bir dip balığı olan kum kayabalığı [*round goby*], son derece duyarlı göğüs yüzgeçlerini kullanır.[34] Denizpapağanına benzer bir deniz kuşu olan bıyıklı alklet, başından çıkan büyük, kavisli, siyah sorguçla, yuva yaptığı kayalıklardaki yarıkların duvarlarını hisseder.[35‡]

Diğer birçok kuşun başında ve yüzünde fırça tüyleri bulunur. Bunlar yanlışlıkla kuşların uçan böcekleri yakalamasına yardım eden ağlar olarak düşünülür. Oysa bu tüyler büyük ihtimalle avını tutarken, yavrularını beslerken ya da karanlık yuvalarda manevra yaparken kuşların kullandığı dokunma sensörleridir.[37] Bu tür kullanımlar, kuşların niye tüyleri olduğunu da açıklayabilir. Kuşların dinozorlardan evrildiği ve birçok dinozor vücudunun sert ilkel tüylerle kaplı olduğu açıktır.[38] Bu

* Böcekler, her segmentten birer çift bacağın çıktığı çok segmentli atalardan evrildiler. Zaman içinde öndeki segmentler kaynaşarak böceğin kafasını oluşturdu ve buradaki uzuvlar ağız parçalarına ya da antenlere dönüştü. Antenler aslında yeni bir amaç edinmiş bacaklar ya da duyusal uzuvlardır.

† Dokunma organlarının uzun olması ya da geniş bir alanı taraması gerekmez. Remoraların sırt yüzgeçleri emici vantuzlara dönüşmüştür; hayvan bu vantuzla büyük balıkların altına yapışır.[33] Vantuz mekanoreseptörlerle doludur; bunlar belki de balığa konakla temas ettiğini haber veriyordur.

‡ Sampath Seneviratne'nin, sorguçlarını ve bıyıklarını bantlayıp karanlık bir labirente koyduğu alkletler başlarını daha fazla sağa sola çarpma eğilimi göstermişti.[36]

yapılar uçmak için kullanılamayacak kadar basit olduğuna göre başka bir nedenle evrilmiş olmalı. En fazla kabul gören açıklama, bu tüylerin yalıtım amaçlı olduğunu ileri sürer ama öyle olsaydı tüylerin birdenbire ve çok sayıda ortaya çıkması gerekirdi. Daha akla yakın bir diğer açıklama, tüylerin başlangıçta dokunsal enformasyon sağlamak için evrilmiş olduğudur. Bıyıklı alkletin gösterdiği gibi, bir hayvan dokunma duyusunun kapsama alanını kendi lehine genişletmek için sadece birkaç sert tüye ihtiyaç duyar. Belki de başlangıçta dinozorların başında ya da kollarında küçük öbekler halinde ortaya çıkan tüyler, ilkin dokunarak hissetmelerine ve daha sonra uçmalarına yardım etmiştir.

Benzer şekilde, memelilerdeki kıllar da başlangıçta dokunma sensörleri olarak ortaya çıkmış, daha sonra ısı yalıtımı sağlayan kürke dönüşmüş olabilir.[39] Kıllardan bazıları o ilk dokunsal işlevini hâlâ devam ettiriyor. Bu kıllara vibrissa (Latince "titremek" anlamındaki *vibrare* sözcüğünden gelir) ya da daha yaygın bilinen adıyla bıyık denir.[40*] Memelilerin yüzünde bulunan bıyıklar, vücuttaki diğer kıllardan daha uzun ve kalındır. Her bir bıyık teli, mekanoreseptörler ve sinirlerle dolu bir kesecikten çıkar. Bıyık şaftı yön değiştirince, tabanı mekanoreseptörleri dürterek beyne sinyal gönderir. (Bir kalemin ucunu avucunuzun içine alıp diğer ucunu oynatarak mekanizmanın nasıl çalıştığını hissedebilirsiniz.)

Bazı memeliler hareket ederken bıyıklarını saniyede birçok kez ileri geri oynatarak etrafı sürekli tarar. Bıyık oynatma (*whisking*) olarak da bilinen bu hareket, kafalarının önündeki ve etrafındaki bölgeyi keşfetmelerine olanak tanır.[41] İlk duyduğumda bıyık oynatmayı hafife almıştım. Karanlık bir koridorda tökezlediğimde duvara çarpmamak ya da elektrik düğmesini bulmak için ellerimle etrafı yoklamama benzer bir şey olduğunu sanmıştım. Fakat duyu biyoloğu Robyn Grant ile konuştuktan sonra, bir farenin ya da sıçanın bıyık oynatırken, benim daha çok gözlerimle yaptığıma benzer bir şey yaptığını anladım. Kemirgen önündeki alanı sürekli olarak, tekrar tekrar tarayarak etrafını saran sahneye dair bir farkındalık oluşturur.[42] Burnundaki hareketli, uzun bıyıklarla bir şey algılarsa çene ve dudaklarındaki daha duyarlı ve daha çok sayıdaki, hareketsiz, kısa bıyıklarıyla araştırmasını derinleştirir.[43] Bu

* Bu bölümde "bıyık" sözcüğünü, ikincil seks karakterlerinden biri olan bıyık anlamında değil, dokunsal işlevi olan "whisker"ın karşılığı olarak kullandık. (*ç.n.*)

davranış, yıldız burunlu köstebeğin burnunu tünelin duvarına bastırarak yıldızıyla nesneleri saptamasına ve en sonunda küçük ama en hassas uzantılarını devreye sokmasına benzer. Ayrıca gözleriyle etrafı tarayan bir insanın, çevresel görüş alanında saptadığı belli bir nesneye yüksek çözünürlüklü foveasıyla odaklanmasına da benzer.

Görmeyle olan benzerlikler bununla sınırla kalmaz. Başımızı çevirince önce gözlerimiz hareket eder; aynı şekilde, bir fare başını çevirirken de önce bıyıkları hareket eder.[44] Biz nasıl retinamıza düşen ışık örüntüsüyle dünyanın bir görsel temsilini oluşturuyorsak fare de bıyıklarıyla algıladığı dokunma örüntülerini kullanarak kendi dünyası için aynı şeyi yapabilir. Bıyıkların her biri somatosensoriyel korteksin farklı bir bölümüne bağlanır; fare böylece bıyıklarından hangilerinin cisimle temas ettiğini bilir. O bıyıkların yönelimini de bildiğinden, "Dokunduğu şeyin görsel bir temsilini oluşturabilir," diyor Grant. O görsel temsilleri meydana getiren bilgi, bıyıkların uçları hareket ettikçe bir belirip bir kayboluyor olsa gerek. Fakat Grant'e göre fare beyni, ayrı ayrı dokunmaları muhtemelen kesintisiz olarak yorumlar. Biz nasıl gözlerimizi sürekli hareket ettirdiğimiz ve kırptığımız halde görmeyi kesintisiz bir deneyimmiş gibi yaşıyorsak, onların da bıyık oynatırken benzer bir şey yaşayıp yaşamadığını merak ediyorum.

Memeliler, neredeyse ilk ortaya çıktıklarından beri bıyıklarını kullanıyor.[45*] Oradan oraya seğirten, tırmanan, küçük, gececil atalarıyla aynı alışkanlıklara sahip sıçanlar ve keselisıçanlar günümüzde hâlâ bıyık oynatır. Ginepigler yarım yamalak bıyık oynatır; kedi ve köpeklerse hâlâ hareketli olmasına rağmen bıyıklarını oynatmaz. İnsanlar ve diğer kuyruksuz maymunlar bıyıklarını tamamen kaybetmiş, onun yerine hassas ellerine yatırım yapmıştır. Balinalar ve yunuslar bıyıklı doğar ama kısa bir süre sonra, dudak ve nefes deliğinin etrafı hariç bıyıkları dökülür. Ne de olsa suyun içinde bıyık oynatmak çok zordur. Fakat buna rağmen *bıyıklar* işe yarayabilir.

---

* Grant keselisıçanın da bıyık oynattığını ve faredekine çok benzer kaslar kullanarak duyu kıllarını kontrol ettiğini gösterdi.[46] Uzaktan akraba bu iki tür, memelilerin aile ağacında, ilk grubun evrilmesinden kısa bir süre sonra ayrılmış dallara mensuptur. Bu da bize, ilk memelilerin dış dünyayı bıyık oynatarak keşfettiğini düşündürür.

***

Sarasota'daki Mote Deniz Laboratuvarı'nda iki manati yaşıyor. Biz onları seyrederken Gordon Bauer, Hugh adlı manatinin hiperaktif olduğunu söylüyor. Buffett adlı (ismi Warren Buffett'tan değil, Jimmy Buffett'tan geliyor) diğer manatiyse ağırkanlı ve biraz kilolu. Hangisinin hangisi olduğunu anlamakta zorlandığımı itiraf ediyorum. Üç metre uzunluğundaki gövdeleriyle her ikisi de aynı derecede yuvarlak ve uyuşuk görünüyor. Fakat bir süre sonra birinin, tankın içinde yavaş yavaş daireler çizerek döndüğünü fark ediyorum. Bu, Hugh. Yaptığı şeyse, hayvanlarda "zoomie"* olarak adlandırılan çılgınca dönme hareketlerinin manatilerdeki karşılığı olsa gerek.

Doğada yaşayan manatiler, sığ denizlerde döne yuvarlana yüzerek sualtı bitkilerini yer. Esaret altında yaşayan Hugh ile Buffett günde yaklaşık 80 baş marul yiyor. Hugh şu anda marullardan birini canla başla ağır ağır parçalıyor. Marulu bazen yüzgeçleri arasında tutuyor. Bazen de yüzüyle, özellikle de üstdudağıyla burun delikleri arasındaki bölümle yokluyor. Ağız diski olarak adlandırılan ve manatilere o sevimli, mahcup ifadeyi veren bu geniş alan, pek öyle görünmese de aynı zamanda olağanüstü duyarlı bir dokunma organı.

Kavrama özelliğine sahip kaslı bir yapı olan ağız diski, dudaktan çok filin hortumuna benzer.[47] Manatiler ağız diskini sıkıp gevşeterek, tıpkı bir el gibi nesneleri büyük bir beceri ve hassasiyetle tutup inceler. Buna ağızla yoklama (*oripulation*) denir. Manatiler, demirleme hatlarından insanların bacaklarına varana kadar çevrelerindeki her şeyi ağzıyla yoklar. Bazen bu yüzden başları derde girer. Nesli tehlikedeki Florida manatileri her şeyi önce yüzleriyle keşfetme alışkanlığından ötürü halatlara ve yengeç tuzaklarına yakalanır. Ancak ağızla yoklama çoğunlukla ilişkilerini güçlendirir. "Her karşılaşmada birbirlerinin yüzünü, yüzgeçlerini, gövdelerini ağızlarıyla yoklarlar," diyor Bauer.

---

* Özellikle kedi ve köpeklerin genellikle birkaç dakika süren enerji patlamaları sırasında daireler çizerek yaptığı dönme hareketi. Çılgınca rasgele aktivite dönemleri ("Frenetic random acitivity periods" ya da kısaca FRAP) olarak da bilinir. (*ç.n.*)

Nitekim Hugh beni ağzıyla yokladı. Buffett bir deneye katılırken Hugh, yaşadıkları çevrili alanın ayrı bir bölümünde takılıyordu. Sırtüstü yatan Hugh'nun yüzgecinden tutan eğiticisi, ağzına pancar atıyordu. Ona doğru eğildim; hoş kokulu nefesini yüzüme üfledi. Elimi suya sokar sokmaz da ağız diskiyle keşfe başladı. Bu iki dokunma organının karşılaşması tuhaf bir histi; benim elim ve Hugh'nun ağız diski birbirinden son derece farklıydı ama ikisi de aynı duyuya hizmet ediyordu. Bana dokunduğunda ne hissettiğini ancak hayal edebilirim; belki yediği sebzelerden daha yumuşak ama kardeşi Buffett'a göre daha pürüzsüzdüm. Elimi ağzıyla yoklaması, köpek yalamasına benziyordu; tek fark, dilini kullanmamasıydı; sadece kavrayıcı dudakları avucumda geziniyordu. Az sonra, Hugh'nun sert bıyıklarından ötürü parmak uçlarımı zımparalanmış gibi hissetmeye başladım.

Bu bıyıklar (vibrissa ya da duyu kılları) ağız diskinin duyarlılığının anahtarıdır. Manatilerde 2 bin civarında bıyık bulunur.[48] Bazıları uzun, ince ve serttir. Bazıları kırık kürdan gibi kısa ve diken dikendir. Ağız diski gevşeyince bıyıklar kaslı kıvrımlar arasında kaybolur ama beslenme ya da keşfetme zamanı gelince manati diski yayıp yassıltır ve bıyıklar ortaya çıkarır.[49] Manati, ağız diskini gereğince sıkıp bıyıklarını hareket ettirerek deniz çayırını biçebilir ya da bir marulu parçalayabilir. "Besini kavrayıp ağzına götürebilir ama aynı zamanda çakıl taşı gibi şeyleri de ağzından çıkarabilir," diyor Bauer. Meslektaşı Roger Reep bir keresinde, ağzının bir tarafıyla bir bitkiyi yiyen ve diğer tarafından yemek istemediği şeyleri çıkaran bir manatinin filmini çekmiş. Manati, bıyıklarını oynatan bir kemirgen gibi, duyu kıllarını bastırarak bir cismin dokusunu ve biçimini saptayabilir; sadece bunu çok daha yavaş yapar. Bauer 2012'de, Hugh ve Buffett'ın, oluklu plastik levhaları, kabartılar arasındaki mesafe farklılığına göre ayırt edip edemediklerini sınadı.[50] Sonraları Sarah Strobel, aynı deneyi deniz samuru Selka ve gönüllü insanlarla yapacaktı. Her iki manati de diğer türler kadar başarılı oldu.* Bu hayvanların yüzü, insanın parmak uçlarına denkti.

Bildiğimiz kadarıyla manatiler duyu kılları dışında hiç kılı olmayan tek memeli grubudur. Ağız diskindeki bıyıklar haricinde 3 bin civarında duyu kılı koca gövdelerinin üzerinde dağınık halde bulunur. Bu ince

* Buffett biraz daha iyiydi; Bauer bu farkı Hugh'nun dikkat süresinin daha kısa olmasına bağlıyor.

ve aralıklı kılları görmekte zorlanıyorum ama nihayet Hugh'nun ışıldayan siluetini göz ucuyla yakalıyorum. "Arada bir, güneşe göre doğru konumdayken buğday tarlası gibi görünürler," diyor Bauer.* Manatiler vücutlarının her yerinde bulunan duyu kıllarını başka bir amaçla –etraflarındaki suyun akışını hissetmek için– kullanır.[52]

Duyu kılları çok yönlü yapılardır. Bıyık oynatan sıçanlarda ve ağzıyla yoklayan manatilerde olduğu gibi, yüzeylere bastırıldığında dokunsal hisler oluşturabilir ama aynı zamanda hava akımı ya da suyun akışıyla pasif olarak bükülebilir ya da yön değiştirebilirler. Bu basınca yanıt veren hayvan, uzaktaki nesnelerin yarattığı akışları saptayarak, doğrudan temas etmeksizin onlara uzaktan dokunabilir. Manatiler bunu kesinlikle yapabilir. Bauer ve meslektaşları, Hugh ile Buffett'ın, duyu kılları aracılığıyla suyun içinde sallanan bir kürenin yarattığı ufacık titreşimleri tespit edebildiklerini gösterdiler.[53] Hayvanların gözleri bağlı, bıyıkları örtülüydü ve küre böğürlerinden bir metre ötede duruyordu. Tüm bunlara rağmen, hatta su metrenin milyonda biri kadar yer değiştirse bile küreyi hissediyorlardı.

Doğada bu "hidrodinamik" duyuyu muhtemelen akıntının yönünü belirlemek, diğer manatilerin ne yaptığını ya da diğer hayvanların yaklaşıp yaklaşmadığını anlamak için kullanırlar. Son derece kötü görmelerine rağmen şnorkelle yüzenlerle aralarındaki mesafeyi korumakta gayet başarılıdırlar. Gelgit zamanı sular yükselirken çoğunlukla haliçlerden yukarı doğru yüzerler. Deniz dibinde gruplar halinde dinlenir, sonra birdenbire nefes almak için hep birlikte yüzeye çıkarlar. Gözleri küçük, bulundukları su bulanık olabilir ama etraflarını, tüm vücuda yayılmış bir tür uzaktan dokunma yoluyla algılarlar. Daha önce de değindiğim gizli sinyallere, doğru duyusal donanıma sahip hayvanların saptayabildiği görünmez enformasyon akışına erişebilirler.

Sarah Strobel'ın deniz samuru Selka'yla çalıştığı Long Deniz Laboratuvarı'nda, Sprouts adlı liman foku havuzda sırtüstü yatıyor. Colleen

* Çıplak kör fare ve daman (hiraks) (marmotlara benzeyen ama aslında fillerin ve manatilerin en yakın akrabası olan küçük hayvanlar) gibi birkaç memelinin daha vücutlarında duyu kılları bulunur.[51] Çıplak kör fareler ve damanlar muhtemelen bu bıyıklar sayesinde, tıpkı bıyıklı alklet gibi, sıkışık tünellerin ve kayalıklardaki yarıkların duvarlarını hissedebilir.

Reichmuth seslenince, Sprouts benekli, gri gövdesini havuzun dışına çekiyor. Reichmuth, konuşmasını istiyor. Sprouts kükremeyle siren düdüğü arası şaşırtıcı derecede yüksek bir sesle karşılık veriyor. "BAA-VAA-VAA-VAA-VAA-VAA-VOOOAAAARRRR," diyor sanki. Elimi göğsünün üstüne koyunca gürlemeyi kolum boyunca hissediyorum. Suyun altında ses çok daha yüksek duyulduğu için yumruk yemiş hissi verebilir.

Fokları, denizaslanlarını ve morsları (denizaygırları) içeren yüzgeçayaklılar (pinnipedler), balinalar ve yunuslar gibi daha popüler deniz memelileri karşısında biliminsanları tarafından çoğunlukla ihmal edilir. Fakat bu hayvanlar, belki yaşamını onlar gibi karada ve denizde olmak üzere ikiye bölmesi gerektiğinden, Reichmuth'u öteden beri büyülemiş. "Yüzerek büyüdüm ve hep suda olmak istedim," diyor Reichmuth. "Bir nevi iki yaşam arasında gidip gelen bu yaratıkların cazibesine kapıldım." Long Deniz Laboratuvarı'na 1990'da gelen Reichmuth o gün bugündür orada çalışıyor ve onca zamandır Sprouts'u tanıyordu. Sprouts, Sea World San Diego'da doğduktan kısa bir süre sonra ve Reichmuth'tan bir yıl önce tesise gelmiş. Onunla tanıştığımda otuz birinci yaş günü yaklaşıyordu, yani yaban doğadaki erkek liman foklarından çok daha uzun yaşamıştı. Yaşlı gözlerinde katarakt olduğu için zar zor görebiliyor. Ama bu, onun için sorun değil. Kör liman fokları, bıyıkları sayesinde yaban doğada bile hayatını sürdürebilir.

Sprouts'un burnundan ve kaşlarından yüz civarında duyu kılı çıkıyor.[54] Dikkatini bana yoğunlaştırdığında bıyıkları yüzünün etrafında âdeta bir çanak anten oluşturuyor. Sprouts bıyıklarıyla biçim ve dokuları ayırt edebilir, sudaki titreşimleri hissedebilir ve engellere çarpmaktan kaçınabilir.[55] Tekrar suya dalınca tankın kenarlarını süpüren bıyıkları, çarpmadan kavisli duvar boyunca yüzmesini sağlıyor. "Ama havuza bir balık atsaydık onu bulmakta zorlanırdı," diyor Reichmuth. "Balık yüzmeye başlamadığı takdirde tabii."

Yüzen bir balık arkasında hidrodinamik bir dümen suyu, yani hayvan geçip gittikten sonra bile dönen suyun oluşturduğu uzun süreli bir iz bırakır. Foklar duyarlı bıyıklarıyla bu izleri saptayıp

yorumlayabilir.* Bu beceri Almanya'nın Rostock şehrinde çalışan Guido Dehnhardt ve ekibi tarafından 2001'de keşfedildi.[57] Ekip, Henry ve Nick adlı iki liman fokunun, bir mini denizaltının suyun altındaki yolunu takip edebildiğini gösterdi. İki hayvan, gözleri bağlı ve kulakları kulaklıkla kapatılmış olsa bile izi takip edebilmişti. Ancak bıyıkları çorapla örtüldüğünde aracı kaybetmişlerdi. O dönemde çoğu araştırmacı hidrodinamik duyuların yalnızca kısa menzilli çalıştığına inanıyordu. Suyun altında hareket eden cisimlerin suda yarattığı bu hareketlenmeler çok çabuk sönümleniyor ve 5-10 santimetre öteden saptanamaz hale geliyor olmalıydı. Fakat hidrodinamik dümen suyu aslında dakikalarca devam eder. Dehnhardt'ın tahminine göre yüzen bir ringa balığı, bir liman fokunun yaklaşık 180 metre öteden takip edebileceği bir iz bırakıyordu.

Sprouts yıllar geçtikçe yaşlanıyor olsa da hidrodinamik duyusu hâlâ keskin. Reichmuth onu uzun bir sopanın ucuna takılı bir topla sınıyor. Havuzun kenarında yürürken topu suda yılankavi hareketlerle ilerletiyor. Sabırla bekleyen Sprouts'a birkaç saniye sonra başlaması için izin veriyor. Sprouts bıyıklarını sağa sola çevirerek etrafı araştırıyor. Kabaca aynı yönde gitmekle kalmayıp, görünmez bir ip boyunca yüzüyormuşçasına, az önce suda inip çıkarak ilerleyen topun rotasını bütün ayrıntılarıyla *birebir* takip ediyor. Görme duyusuna güveniyor olamaz; yaşından ötürü iyi göremediği gibi ona özel yapılmış bir göz bandı takıyor. Görerek ilerlemek yerine, gelip geçici girdapların suda bıraktığı izi takip ediyor. İzin arkasında dolaşmaya başlayınca, kenarlarını bulmak için bir yılanın çatal diliyle yaptığı gibi başını sağa sola çeviriyor. Su fışkıran bir borunun üzerinden geçerken bir süreliğine kaybettiği izi, boruyu geçer geçmez çabucak

* Foklar buz gibi suya dalarken bile bıyıklarını aktif olarak sıcak tutar.[56] Bu, dokuların gerilmesini önleyerek bıyıkların serbestçe hareket etmesini sağlar. Foklar bunun için bedel öder. Duyu organlarında genellikle iç organlardaki gibi bir ısı yalıtımı yapılamaz. Duyu organları yüzeye yakın olmak zorundadır; o nedenle genellikle ısı kaybederler. Bu organları buzlu suda ısıtmak, kapı eşiğinde radyatör çalıştırmaya benzer. Hayvanın bu kadar zahmete katlanması, bu organların ne kadar değerli olduğunun göstergesidir.

yeniden buluyor.* İz kendi içine doğru kıvrıldığında Sprouts da öyle yapıyor. Onu seyrederken, kokuların izini süren ve daha önce oradan geçmiş olanların kokusunu takip eden köpek Finn'i anımsıyorum. Dokunma duyusu bizim için şimdiki zamanda, sensörler yüzeyle temas ettiği anda köklenir. Oysa Sprouts için dokunma, tıpkı Finn için koklama duyusunda olduğu gibi yakın geçmişe uzanıyor. Bıyıkları, olmakta olanı değil olmuş olanı hissedebiliyor.

Dehnhardt tarafından ilk kez keşfedildiğinde bu beceri imkânsız görünüyordu. Bir fok yüzerken bıyıkları suyun içinde kendi girdaplarını oluşturur. Bu girdapların hayvanın bıyıklarını titreştirmesi ve uzaktaki balıkların dümen suyunun ürettiği daha zayıf sinyalleri boğması gerekir. Fakat Sprouts başını sudan çıkarınca, liman foklarının bu sorunu çözmüş olduğu açıkça anlaşılıyor. Yakından bakınca bıyıklarının hafif yassı ve ince kenarı her zaman suyu yaracak şekilde açılanmış olduğunu görebiliyorum. Ayrıca bıyıklar pürüzsüz değil. İlk bakışta su zerreleriyle kaplıymış gibi görünen bıyıkların üzerinde parmağımı gezdirince kuru olduklarını ve "zerrelerin" aslında bıyığın yapısal parçaları olduğunu fark ediyorum. Bunlar bıyığın dalgalı yüzeyi boylu boyunca boğum boğum bir yapı oluşturuyor. Rostock ekibi bu yapının, bıyıkların oluşturduğu girdapları belirgin biçimde azalttığını gösterdi.[58] Bu tuhaf anatomi sayesinde foklar kendi vücutlarından gelen sinyalleri bastırıp, avın geride bıraktığı sinyalleri güçlendirebilir. Bu yassı, dalgalı bıyıklar çok sayıda duyu kıllarıyla zemine gömülü kabuklu deniz hayvanlarını hissedebilen morslarda bulunmaz. Güçlü görme duyusunun yönlendirdiği denizaslanlarında da bulunmaz. Bu bıyıklar, hidrodinamik dümen suyunu izlemede diğer yüzgeçayaklılardan çok daha başarılı olan foklara özgüdür.†

---

* ABD ordusu sualtında hareket eden gizli cisimlerin izini sürebilecek araçlar geliştirme ümidiyle bu tür çalışmaları malum sebeplerden dolayı destekliyor. Reichmuth, Sprouts'u işaret ederek, "Böyle bir hayvanın biyolojik yetilerini taklit eden cihazlar geliştirebilir miyiz?" diye soruyor. "Şimdiye kadar bu sorunun yanıtı hep hayır oldu."

† Sakallı foklar istisnadır. Bu hayvanların bıyıkları basit ve silindiriktir çünkü morslar gibi sakallı foklar da avlarını deniz dibinde eşeleyerek bulur. Dolayısıyla güçlü bir hidrodinamik duyuya ihtiyaç duymazlar.

Sprouts hünerlerini sergiledikten sonra tankın dibine inip bekliyor. Liman fokları bunu doğada da yapar. Karanlık bir kelp ormanında pusuya yatıp gelen geçen balıkların dümen suyunu çanak anten şeklindeki dik bıyıklarıyla saptarlar. Fok, sırf bu izlere dayanarak bir balığın hangi yöne yüzmüş olduğunu anlayabilir.[59] Farklı boyut ve biçimlerdeki nesnelerin dümen sularını birbirinden ayırt edebildiği için sadece en büyük ve en besleyici bireylerin peşine düşebilir.[60] İlla dümen suyu olması da gerekmez. Bir deneyde, Henry ve Rostock'taki diğer foklar, deniz tabanından yükselen ve yassı balıkların solungaçlarından kaynaklanıyor olabilecek hafif akıntıları saptayabilmişler.[61] Bu balıklar hiç kıpırdamadan yatıp kamufle olabilir ama bir fok yine de yüzüyle onların alıp verdiği nefesleri hissedebilir. Fokun dokunsal dünyası akış ve harekete ayarlıdır ve hareket etmemek avın elinde değildir. Bu, adil olmayan bir yarış gibi görünebilir ama avın da kendine has inanılmaz hidrodinamik güçleri vardır.

Foklar ve suyun altındaki diğer yırtıcılar bir grup balığa doğru hücum edince sürü yekvücut davranır. Balıklar rasgele kaçışmaz. Birbirleriyle çarpışmazlar. Saldırganların etrafında, tıpkı içinde yaşadıkları su gibi akıyor görünürler. Bu mucizevi eşgüdüm kısmen görme duyusuna ama aynı zamanda yanal çizgi dediğimiz bir sensör sistemine dayanır.

Yanal çizgi bütün balıklarda ve bazı amfibilerde bulunur.[62] Genellikle balığın başında ve böğründeki az sayıda görülebilir gözeneğin yanı sıra, derinin hemen altındaki sıvıyla dolu kanallardan oluşur. Gözenekleri on yedinci yüzyılda tanımlayan biliminsanları 200 yıl boyunca bunların mukus salgıladığını düşündüler.[63] Fakat yakından incelediklerinde, jölemsi bir kubbeyle örtülü küçük gruplar oluşturan armut şeklinde hücreler gördüler. Nöromast olarak adlandırdığımız bu yapıların birer sensör olduğu açıktı. Biyolog Sven Dijkgraaf, 1930'larda kör balıkların yanal çizgilerini kullanarak, yakınlarında hareket eden nesnelerin yarattığı akıntıları saptayabildiğini gösterdi.[64*] Daha etkileyici olansa

* Balıkbilimci (ihtiyolog) Bruno Hofer 1908'de yanal çizginin işlevini neredeyse çözmüştü.[65] Kör bir turna balığının, yanal çizgisi salim olduğu sürece engellere çarpmadığını ve sudaki akıntılara tepki verdiğini fark etti. Hofer, turna balığının bu organ sayesinde suyun akışını algılayarak "uzaktan hissedebildiği" gibi isabetli bir çıkarımda bulundu. Ne yazık ki bu iddiasını, kendi çıkardığı, pek okunmayan ve kıyıda köşede kalmış, kısa ömürlü bir dergide yayımladı.

kendi oluşturdukları akıntıları analiz ederek hareketsiz nesneleri de saptayabilmeleriydi.

Balık yüzerken önündeki suyun yerini değiştirerek gövdesini saran bir akış alanı oluşturur. Engeller bu alanın biçimini bozar ve yanal çizgi bu değişiklikleri saptayarak balığa çevresiyle ilgili hidrodinamik bir farkındalık kazandırır. Dijkgraaf, balık akvaryumun duvarına doğru yüzerse duvar "su parçacıklarının engelsiz sudaki gibi serbestçe hareket etmesini engeller ve balık suyun direncinde 'beklenmedik' bir artışla karşılaşır" diye yazmıştır.[66] Bu, büyük kumkuşlarının gömülü deniztaraklarının yerini bulmak için kullandığı tekniğe benzer. Manatiler de etraflarındaki bulanık suda ne olduğunu muhtemelen böyle algılar. Fakat manatiler ya da büyük kumkuşları ortaya çıkmadan yüz milyonlarca yıl önce balıklar, suyun hareketlerine çok daha duyarlı yanal çizgilerini kullanmaya başlamıştı.*

Balık yanal çizgi sayesinde, çevresinde akan zengin enformasyon kaynaklarını kelimenin tam anlamıyla hissedebilir.[68] Dijkgraaf, balığın uzunluğunun iki katı kadar mesafeye dek hemen her yöne uzanan bu farkındalığı "uzaktan dokunma" olarak tanımlıyor. Bizler de derimizi yalayıp geçen güçlü akıntıları hissedebiliriz ama yıllardır bu sistem üzerinde çalışan Sheryl Coombs, "Bunun yanal çizgi sayesinde balıkların yaşadığı tecrübenin yakınından bile geçtiğini sanmam," diyor. Sokakta yürürken ışık ve renk örüntüleri retinamız üzerinde hareket ettikçe çevremizde geçip giden şeyleri algılarız. Belki bir balık da hareket eden suyun yanal çizgisi üzerinden geçen örüntüleriyle benzer bir tecrübe yaşıyordur. Balıklar akan suda yön bulmak, avlanmak, yırtıcılardan kaçmak ve birbirlerinden haberdar olmak için kesinlikle bu örüntüleri kullanır. Sürü oluşturan balıklar yanal çizgilerini kullanarak hızlarını ve yönlerini en yakındaki komşularına göre ayarlar.[69] Bir yırtıcı hamle yaptığında, balıklara doğru gelen suyun ani hareketi, en yakındaki bireylerin yanal çizgilerini uyararak hızla uzaklaşmalarına neden olur.

* Dijkgraaf, 1963'te çalışmalarını özetlediği ufuk açıcı makalede, yanal çizginin memelilerdeki duyu kıllarına benzer "özelleşmiş bir dokunma organı" olduğunu savunuyordu.[67] Manatinin vücudundaki duyu kıllarının hidrodinamik yetenekleri keşfedildiğindeyse, kavram hoş bir biçimde tersyüz edilerek, bu kılların yanal çizginin memelilerdeki eşdeğeri olduğu söylenmişti.

Onların bu şaşkın ve ürkek hareketleri komşularının ve onlarınki de diğerlerinin yanal çizgilerini uyarır. Böylece panik dalgası yayılır ve sürü bir bütün olarak yırtıcıdan uzaklaşır. Her balık sadece etrafındaki küçük su hacmine tabidir ama dokunma duyusu hepsinin birbirine bağlayarak eşgüdümlü hareket etmelerini sağlar. Kör balıklar da sürü halinde hareket edebilir.[70]

Tüm balıklardaki temel nöromast yapısı aynı olmakla birlikte, birçoğunda yanal çizgi alışılmadık ölçüde genişledi ve ufak tefek değişikliklere uğradı.[71] Yüzeyde beslenen balıkların suya düşen böceklerin titreşimlerini algılayan nöromastlarla dolu kafaları yassılaştı.[72] Yarımgaga balıklarında alt çene öne doğru çok fazla çıkıntı yapar ve alt çene boyunca yer alan nöromastlar sayesinde balık, avının, ağzıyla aynı hizada yüzüp yüzmediğini anlayabilir.[73] Görme duyusunu kaybetmiş kör mağara balığı, çok sayıdaki olağanüstü büyük ve duyarlı nöromastı sayesinde yolunu bulur.[74*] Bazı balıklarsa yanal çizgilerini beklenmedik şekilde neredeyse hepten kaybetmiştir.

Hem mağaralara hem de sıradışı hayvanlara tutkun Daphne Soares, 2012'de, *Astroblepus phoeleter* adlı kör yayınbalığını görmek için Ekvador'a gitti. Tek bir mağarada yaşayan bu balık o kadar az biliniyordu ki yerel bir adı dahi yoktu. Hayvanı mikroskop altında inceleyen Soares, mağaralarda yaşayan, görme duyusunu kaybetmiş çoğu balık gibi, kör yayınbalığında da çok büyük ve son derece hassas nöromastlar bulmayı beklerken neredeyse hiç nöromast bulamayınca çok şaşırdı.[76] Onun yerine hayvanın derisinin, daha önce benzerini görmediği, minik "joystick"leri andıran yapılarla kaplı olduğunu keşfetti. "Bilimle uğraşmamın nedeni bu zaten: 'Bunun ne olduğunu merak ediyorum' duygusu," diyor Soares.

Soares, bu yapıların birer mekanosensör olduğunu gösterdi.[77] Daha da şaşırtıcısı, bunların *diş* olduğunu öğrendi. Diş benzeri yapılar değil; mine ve dentinden yapılmış, tabanından sinirlerin çıktığı basbayağı dişti

* Kör mağara balıklarının bir kısmı, hızlı hareketlerle ileri atılma ile yavaşça süzülme arasında geçiş yaptıkları benzersiz bir yüzme stili geliştirdi.[75] Hızlı hareketler itici gücü oluşturur ama yanal çizgiyi hiçe sayar. Süzülmeyse daha yavaştır ama balığın çevredeki nesneleri daha kolay ayırt etmesini sağlayan sabit bir akış alanı oluşturur.

bunlar. Çoğu yayınbalığı vücut yüzeyini tat tomurcuklarıyla kaplamışken, mağarada yaşayan bu tür aynısını dişlerle yapmış, onları tüm vücudu kaplayan akış sensörlerine dönüştürmüştü. Bu, ataları zaten tam anlamıyla işlevsel yanal çizgiye sahip bir hayvan için tuhaf bir yenilik gibi görünüyor. Fakat Soares bu yayınbalıklarının, hemen her gün sağanak nedeniyle sel basan bir mağarada yaşadığına dikkat çekiyor. Şiddetli akıntıların yanal çizgiye ağır gelmiş ve balığı daha sert sensörler geliştirmeye zorlamış olabileceğini düşünüyor. Şimdiyse balıklar derilerindeki dişleri, vantuzumsu ağızlarıyla kayalara yapışıp sağanağı bekledikleri sakin bölgeler bulmak için kullanıyor. Soares, başka mağara balıklarında da garip dokunma sensörleri olup olmadığını araştırıyor.* "Acayip hayvanları seviyorum," diyor. "Ne kadar uç, eski ya da benzersizse o kadar iyi."

Soares, mağara balıklarının yaşamına henüz girmediği 1999 yazında, bir kamyonetin arkasında, ABD Balık ve Yaban Hayatı Hizmetleri'nin yakaladığı büyük bir alligatorun yanında oturuyordu. Uzun süren yolculuk sırasında yol arkadaşının bantla sarılı ağzını yakından inceleme fırsatı buldu. Tümsekleri ilk kez o zaman fark etti.

Alligatorların çene kenarları boyunca siyah noktalardan oluşmuş bir sakal gibi görünen koyu renkli, kabarık kubbecikler bulunur. Biliminsanlarının ilk kez on dokuzuncu yüzyılda tanımladığı bu tümseklerin ne işe yaradığını kimse bilmiyordu. "Duyusal bir bağlantıları olduğunu düşündüm," diyor Soares. Laboratuvarına dönünce yaptığı incelemede bu tümseklerin sinir uçları içerdiğini gördü. Ama kıl, gözenek ya da bu sinirleri uyarabilecek aşikâr başka bir yapı bulamadı. Suyun içinde sakinleştirici verilmiş alligatorlarla çalışan Soares, tümsekleri ışık, elektrik alanları ya da kokmuş, lezzetli balık parçalarıyla uyarmaya çalıştı ama sinirler hiçbirine tepki vermedi. Derken bir gün, suya düşürdüğü

* Bunlardan biri, Çin'de yaşayan *Sinocyclocheilus* adlı balıktır. Bu hayvan uzun, yukarı kıvrık burnu ve sırtındaki öne uzanan esrarengiz kamburuyla balık ile ütü arası bir görünüme sahiptir. Yanal çizgisi normaldir ama Soares'a göre boynuz, balığın önünde bir burun dalgası yaratarak nöromastları duyarlı hale getiriyor olabilir. Bunun doğru olduğunu kanıtlamak için daha fazla çalışması gerekecek ama Soares başlamaya dünden hevesli.

bir aleti almak için uzandı. Eli yüzeye değince su dalgalandı ve bu dalgacıklar alligatorun yüzüne çarpınca tümseklerdeki sinirler harekete geçti. "Hayal görmediğimden emin olmak için arkadaşlarımı çağırdım," diyor Soares.

Tümseklerin, su yüzeyindeki titreşimleri saptayabilen basınç reseptörleri olduğunu keşfetti.[78] Köstebeklerdeki Eimer organlarına benzeyen bu tümsekler küçük birer düğme gibi çalışıyor olabilir. Tümsekler o kadar hassastı ki Soares, sakinleştirici verilmemiş bir alligatorun tankına bir damlacık su bıraksa hayvan, gözleri bağlı ve kulakları tıkalı olduğu halde, suyun damladığı yere dönüp hamle yapıyordu. Fakat burnu plastik bir kılıfla sarılınca damlaları fark etmiyordu. Alligatorlar, havayla suyun birleştiği ince yatay tabakayı bu tümseklerle tarar. O tabakada pusuya yatıp avının yüzeye konmasını ya da su içmek için suyun kenarına gelmesini bekler. Bu stratejinin işlemesi için kılını kıpırdatmadan beklemesi gerekir; o nedenle köstebekler, fareler ya da manatiler gibi çılgınca bir arayışa giremez. Hareket etmeden beklerken, hareket eden her şeyi dokunma sensörleriyle tespit eder.*

Tümsekler, avın suda oluşturduğu dalgalanmalardan fazlasını saptayabilir. Erkek alligartorlar, dişilerin dikkatini çekmek istediğinde derinden böğürür. Bu ses, sırtının üzerindeki suyu titreştirerek, kızartma tavasındaki yağ gibi cızırdatır. Öteki alligatorlar hassas yüzleriyle bu titreşimleri hissediyor olabilir. Tümsekler dişlerin çevresinde ve ağzın içinde de bulunur; dolayısıyla timsahgiller bunları yiyeceklerini değerlendirmek veya ısırıklarını ayarlamak için kullanabilir. Çenelerini hareket ettirerek su altında yiyecek ararken, tümsekler sayesinde yenilebilir bir şeye rastladıklarını anlayabilirler. Anne timsah, yumurtadan çıkmak üzere olan yavruların çığlıklarını duyduğunda, tümsekler sayesinde

* Timsahgiller (alligatorlar, timsahlar ve akrabaları) ezelden beri suda yaşamamıştı. Onlar ve nesli tükenmiş akrabalarının geçmişi 230 milyon yıl öncesine dayanıyor. O tarih öncesi türlerin birçoğu, kediler gibi sinsi sinsi dolaşan ya da atlar gibi dörtnala koşan karasal hayvanlardı. Bu hayvanların hangi duyulara sahip olduğunu kestirmek zor ama onlardan geriye kalan kafatasları bize ipucu veriyor. Eğer onlarda da günümüzde yaşayan timsahlardaki gibi suda dalgalanmaları saptayan tümsekler bulunsaydı çenelerinde sinirlerin geçtiği delikler görmemiz gerekirdi. Hepsinde olmasa bile bazılarında bu delikler vardı. Timsahgiller ancak su yaşamına geçmeye başladıktan sonra basınca duyarlı tümsekler evrildi.[79]

yumurtaları kırmak için gerektiği kadar kuvvet uygulayabilir. Hassas dokuma duyusu, yavrularını ağzında taşırken, ısırması gereken avla ısırmaması gereken bebeklerini birbirinden ayırt etmesini sağlayabilir.

Bu durum, timsahların hissetmeyen, kaba hayvanlar olduğuna dair her türlü kalıp yargıya ters düşer. Kemikleri ve kemiksi plakalardan bir zırhla kaplı kalın deriyi parçalayabilen çeneleriyle timsahlar zarafetin antitezi gibi görünür. Ne var ki Ken Catania ile öğrencisi Duncan Leitch'ın gösterdiği gibi, tepeden tırnağa, basınç dalgalanmalarına parmak uçlarımızdan 10 kat daha hassas sensörlerle kaplıdırlar.[80]

Duyarsız gibi görünen canlılardaki başka hangi dokunma organlarını gözden kaçırmış olabiliriz? Birçok yılanın kafasındaki pullarda dokunmaya duyarlı binlerce kabartı bulunur.[81] Bu tümsekler özellikle deniz yılanlarında yaygın ve belirgindir; yılanlar onları timsahgillerdeki gibi hidrodinamik sensörler olarak kullanıyor olabilir. Sırtında yelkene benzer büyük bir çıkıntı bulunan bir dinozor olan *Spinosaurus*'un burnunun ucunda, timsah kafatasındaki delikleri andıran gözenekler bulunuyordu.[82] Bu gözeneklerden belki de basınç saptayan tümseklere giren sinirler geçiyordu. Yüzü timsah yüzüne benzeyen *Spinosaurus* genellikle balıkla beslenen bir yarı su hayvanı olarak tasvir edilir; belki suda dalgalanmalar oluşturan avı hisseden dokunma sensörleri de kullanıyordu. *Tyrannosaurus*'un yakın akrabası *Daspletosaurus*'un da çenelerinde amacını açığa vuran delikler vardı ve bunlar da belki duyusal tümseklerle kaplıydı.[83] Bu dinozorlar suda yaşamıyordu ama belki kur yaparken hassas yüzlerini birbirlerine sürtüyor ya da yavrularını ağızlarında taşırken sensörleri kullanıyorlardı. Bu tür spekülasyonlar zorlama görünebilir ama timsahların tümseklerini, balıkların yanal çizgilerini ya da fokların bıyıklarını düşünürsek o kadar da abartılı gelmeyebilir. Ne de olsa bilimin, bazıları apaçık gözümüzün önünde olduğu halde dokunma ve akış sensörlerini hafife aldığı ya da gözden kaçırdığı uzun bir sabıka kaydı var.

Pek az kuş, tavus kuşu kadar dikkat çekici ve şatafatlıdır. Ama o gösterişli, yanardöner kuyruğu bir kenara bırakın. Onun yerine kuşun başındaki mablak (spatül) benzeri sert tüylerin oluşturduğu sorguca odaklanın. Bu tüyler son derece dikkat çekici olmalarına rağmen genellikle göz

ardı edilir. Sorguç tüylerinin bir amaca hizmet edip etmediğini anlamak isteyen Suzanne Amador Kane, hayvanat bahçesinde kutup ayısının yaşadığı alana uçmuş talihsiz bir tavus kuşunun yanı sıra kuşhanelerden ve üreticilerden topladığı tavuskuşlarının sorguçlarını inceledi.[84] Kane'in öğrencisi Daniel Van Beveren, mekanik bir çalkalayıcının üstüne yerleştirdiği sorguçların ileri geri sallanmalarını izledi. Tüyler tam olarak 26 Hz'de (yani saniyede 26 kez) sarsıldığında olağanüstü güçlü hareket ediyordu. Bu, onların rezonans frekansıdır. Dahası, kur yapan erkek tavus kuşu da kuyruk tüylerini aynı frekansla sallar. Kane'e göre bu "bir rastlantı olamaz". Van Beveren çalkalayıcıya monte ettiği sorguçlara farklı kayıtlar çalmıştı. Kuyruğunu sallayan gerçek bir tavus kuşunun kaydını çaldığı sırada rezonansa giren sorguç tüyleri, Bee Gees'den "Staying Alive"ı ya da başka kayıtları çaldığında etkilenmemişti.

Bu sonuçlar, kur yapan bir erkeğin önünde duran dişi tavus kuşunun, kuyruğun havada yarattığı hareketlenmeyi algılayabileceğini düşündürüyor.[85] Dişi, erkeğin çabalarını, görmenin yanı sıra *hissediyor* da olabilir. (Tam tersi de mümkün, zira bazen dişiler de erkeklere gösteri yapar.) Kane düşüncesini kanıtlamak için kur yapan tavuskuşlarını gerçek hayatta filme çekip hayvanların tüylerini sahiden de aynı frekansta sallayıp sallamadığına bakmak istiyor.* Eğer öyleyse bu, bütün debdebesine rağmen tavus kuşunun kur gösterisinin, insanların bugüne dek fark edemediği gizli bir bileşeni olduğu anlamına gelir. O bileşeni layıkıyla anlayabilmek için gereken donanımdan yoksunuz. Hayvanlar âlemindeki en şaşaalı gösterilerden birinde dahi bir şeyleri gözden kaçırıyorsak kimbilir başka neleri atlıyoruz?

Bu sorguç tüylerinden her birinin dibinde saplı hav (*filoplume*) olarak adlandırılan nispeten küçük, eşlikçi birer tüy bulunur; bu tüycükler bize bir ipucu verebilir. Saplı hav, basit bir ana eksenden ve bunun ucunda, olasılıkla mekanik sensör işlevi gören bir püskülden oluşur. Sorguç tüyünün, hareket eden havanın etkisiyle sallandıkça dibindeki tüycüğü dürttüğü ve onun da bir siniri harekete geçirdiği düşünülüyor. Kuşların çoğunda saplı hav bulunur ve bunlar hemen her zaman başka bir tüyle

* Söylemesi kolay ama yeşil sorguçlu dişiler genellikle yeşilliğin önünde durur. Ancak Kane'in beyaz tavus kuşu sahibi üreticilerle müzakereleri sürüyor.

ilişkilidir. Kuşlar, saplı hav yardımıyla diğer tüylerinin konumunu takip ederek ne zaman tarazlandığını ve düzeltilmesi gerektiğini algılayabilir. Ama saplı hav özellikle uçuş sırasında önemlidir.[86]

Kuş uçuşu o kadar zahmetsiz görünür ki ne kadar çaba gerektirdiği kolayca unutulur. Kuşlar havada kalmak için kanatlarının duruşunu ve açısını sürekli ayarlar. Her şeyi doğru yaparlarsa hava kanat konturlarından kayarcasına akarak hayvanı havada tutar. Fakat kanatlarını fazla dik tutarlarsa düzgün akış bozulur, türbülans yaratan girdaplar oluşur ve kaldırma kuvveti ortadan kalkar. Kuş, tutunma kaybı olarak adlandırılan bu durumu önleyemez ya da düzeltemezse düşer. Ancak bu pek nadir görülür çünkü saplı hav, inanılmaz bir biçimde, kuşun kanatlarını hızla ayarlaması ve havada kalması için gereken bilgiyi sağlar.[87] Bir keresinde teknedeyken bir martının yanımdan uçtuğunu hatırlıyorum. Hava rüzgârlıydı ve tekne de kuş da hızlı gidiyordu. Kolumu uzatıp elimin üzerinden ve parmaklarımın arasından esen rüzgârı hissedince martı kanadının aynı hava akımlarını biçimlendirip kuşu havada tutabilmesine hayret etmiştim. Ama kuşun tam olarak ne yaptığını, saplı hav sayesinde çevresindeki havayı okuduğunu ve uçuş sırasında küçük ayarlamalar yaptığını anlamamıştım. Fransız oftalmolog (gözbilimci) André Rochon- Duvigneaud, kuş "kılavuzu göz olan bir kanat" derken yanılıyordu; kanat kendi kendinin kılavuzudur.

Aynısı yarasalar için de söylenebilir. Yarasaların kanat zarları, kuşların tüylü kanatlarından çok farklı olmakla birlikte onlar kadar hassastır. Yarasa kanadında küçük kubbelerden çıkan ve mekanoreseptörlerle bağlantılı olan, dokunmaya duyarlı kıllar bulunur.[88*] Susanne Sterbing bu kılların çoğunun kanat tutunmayı kaybetmek üzereyken arkadan öne doğu esen hava akımlarına tepki verdiğini gösterdi. Yarasalar da kuşlar gibi bu anları hissedip düzeltici önlemler alabilir. Kıllar sayesinde uçarken yan yatabilir, havada durabilir, geriye doğru takla atıp kuyruklarıyla böcekleri yakalayabilir, hatta başa aşağı iniş yapabilirler. Sterbing

* Gözle görülemeyecek kadar kısa ve ince bu kıllar ısı yalıtımı yapmaz. Biliminsanları 1912'de bunların, hayvanın karanlıkta uçmasını sağlayan hava akımı sensörleri olabileceğini ileri sürdü. Fakat yarasaların sonarlarıyla yön bulduğu anlaşıldıktan sonra dokunma duyularına karşı ilgi azaldı. Susan Sterbing 2011'de bu ilgiyi yeniden alevlendirdi.

yarasaların kanatlarına tüy dökücü krem sürdükten sonra hayvanları engelli parkura bıraktığında işlemin etkilerini açıkça gördü.[89] Yarasalar hiç engele çarpmadı ama engellerin epey uzağından geçti, dönüşleri açıktan aldı ve beceriksizce uçtular. Tersine, kılları varken engellere çok yakın uçabiliyor, U dönüşü yapabiliyorlardı. Yarasalarda uçma ile akrobatik uçma arasındaki farkı yaratan şey hava akımı sensörleridir.

Ancak diğer hayvanlarda bu tür sensörler yaşamla ölüm arasındaki çizgiyi belirler. Belki de bu yüzden yeryüzündeki en duyarlı organlardan bazıları bu hayvanlarda evrilmiştir.

1960 yılında Almanya'nın Münih kentindeki bir pazar yerine bir muz sevkiyatı ulaştı.[90] Orta ya da Güney Amerika'da bir yerden gelen muzlar beraberinde birkaç otostopçu getirmişti: el ayası büyüklüğünde üç örümcek. Örümcekler Münih Üniversitesi'ne gönderildi ve Mechthild Melchers tarafından incelenmeye ve üretilmeye başladı. Bacaklarındaki turuncu-siyah şeritlerden ötürü kaplan gezgin örümceği olarak adlandırılan bu tür, o zamandan bu yana dünyada en ayrıntılı incelenmiş örümcektir.

Kaplan gezgin örümceği avlanmak için ağ örmek yerine oturup avını bekler. Bacakları yüz binlerce kılla kaplıdır ve bunlar o kadar sıktır ki milimetrekare başına 400 kıl düşebilir.[91] Hemen hepsi sinirlerle bağlantılı ve dokunmaya duyarlıdır. Tek bir bacaktaki birkaç kılı dürttüğünüzde bile örümcek ya bacağını geri çeker ya da dönüp ne olduğuna bakar. Koşarken kılları bir cisme –sözgelimi meraklı bir biliminsanının, örümceğin yolu üzerine gerdiği bir tele– sürtünürse gövdesini yukarı kaldırıp engelin üstünden atlar.[92] Erkek örümcek kur yaptığı dişiye yem olmamak için eşinin kıllarını tam da olması gerektiği şekilde uyarabilir.

Bu kılların çoğu yalnızca doğrudan temasa yanıt verir ama bazıları o kadar uzun ve hassastır ki rüzgârdan bile etkilenir. Bunlara, Yunanca "kıl" anlamına gelen *trichos* ve "küçük oyuk" anlamına gelen *bothrion* sözcüklerinden türetilerek trikobotriyum adı verilmiştir. Kuşlardaki saplı hav ya da balıklardaki nöromastlar gibi bunlar da akış sensörüdür ama fevkalade hassastırlar. *Dakikada* sadece birkaç santimetre hızla hareket eden hava, yani esinti bile denemeyecek kadar hafif bir esinti dahi kılların yönünü saptırır.[93] Mikroskopla bakarsanız çevrelerindeki hiçbir

şey kıpırdamadığı halde bu kılların, hissedilemeyecek kadar belirsiz hava akımlarının etkisiyle dalgalandığını görürsünüz. Her bacağında yüzer tane trikobotriyum bulunan kaplan gezgin örümceği, hangi yönden gelirse gelsin etrafındaki hava akımıyla uyumlanabilir. Bu duyarlılığı ölümcül amaçlar için kullanır.

Örümcek yağmur ormanında gün boyunca ölü yapraklardan oluşan örtünün altında saklanır ve ancak güneş battıktan yarım saat sonra ortaya çıkar. Bir yaprağın üstünde beklemeye başlar. Karanlık basarken şiddetli rüzgârların dinmesiyle birlikte, çevredeki istikrarlı hava akımında örümceğin göz ardı ettiği düşük frekanslar hâkim olur. Ancak örümceğin trikobotriyumları, havada uçan böceklerin, örneğin yaklaşan bir sineğin çıkardığı yüksek frekanslara ayarlıdır. Sinek çok küçük olabilir ama yine de önündeki havayı iter. Örümcek başlangıçta hareket eden havayı arkaplandaki hava akımından ayırt edemez. Fakat örümceğin 4 santimetre kadar yakınına geldiğinde sineğin sinyali, sisler arasında beliren bir siluet gibi fark edilir hale gelir. Sineğe en yakın bacaktaki kıllar, diğer yedi bacaktaki kıllardan önce hareket etmeye başlar ve bu farkı hisseden örümcek yaklaşan avına doğru döner. Sinek, örümceğin bacaklarından birinin üzerinden geçerken trikobotriyumların yönünü saptırır ve örümcek zıplar. Sineği ön bacaklarıyla havada yakalar, yere indirip sürükler ve ısırıp zehrini boşaltır.[94] 1963'ten beri bu örümcek üzerinde çalışan ve sıçramalarını defalarca izlemiş olan Friedrich Barth, "Zıplarken bile rotasını düzeltebilir," diyor. "Hep böyle bir robot yapmanın ne kadar zor olacağını düşünmüşümdür."

Ancak böcekler çaresiz değildir. Birçoğunun kendi hava akımı sensörleri bulunur.[95] Ağaç cırcırböceklerinin arka ucundan serkus olarak adlandırılan bir çift dikenimsi yapı uzanır. Bunlar, en az örümceğin trikobotriyumları kadar hassas yüzlerce kılla kaplıdır. Bu ipliksi (filiform) kıllar bir eşekarısının kanat hareketlerinin yarattığı hava akımını saptayabilir. Jerome Casas, bu kılların, saldırıya geçen bir örümceğin yok denecek kadar hafif olan esintisini saptayabileceğini gösterdi.

Cırcırböceğinin başlıca düşmanı kurt örümceği avını kovalar. Ormanın yapraklarla kaplı, engebeli zemininde, hedefiyle aynı yaprağın üzerinde dururken saldırıya geçmesi gerekir. Hızlı olmasına hızlıdır ama Casas'ın keşfettiği üzere, cırcırböceğinin kılları, örümceği koşmaya

başladığı anda hissedebilir.[96] Hatta örümcek ne kadar hızlı hareket ederse cırcırböceği onu o kadar kolay saptayabilir. Örümceğin tek umudu, önünde en küçük bir hava akımı yaratmaksızın ağır ağır ve sinsice hareket ederek, avına son hamleyi yapabilecek kadar yaklaşmaktır. O zaman bile başarma olasılığı 50'de 1'dir. "Cırcırböceği hemen her zaman kazanır," diyor Casas. Yapraktan atlayıp başka bir yere konduğu anda oyun biter. Başka bir dünyaya geçmiştir."*

Cırcırböceklerinin ipliksi kılları ve örümceklerin trikobotriyumları akıl almaz derecede hassastır. Görünür ışığın en küçük birimi olan tek bir fotondaki enerjinin çok küçük bir kısmı bu yapıları yönünden saptırılabilir. Kıllar, var olan ya da *var olması mümkün olan* herhangi bir görme reseptöründen yüz kat daha duyarlıdır.[98] Nitekim bir cırcırböceğinin kıllarının dikilmesi için gereken enerji miktarı, termal gürültüye, yani titreşen moleküllerin kinetik enerjisine çok yakındır. Bir başka deyişle fizik yasalarına karşı gelmeden bu kılların duyarlılığını artırmanız imkânsızdır.

O halde niye her şey bu kılları uyarmıyor? Örümcekler niye durmadan hayalî böceklerin üzerine atlamıyor ya da cırcırböcekleri sürekli hayalet örümceklerden kaçmıyor? Kısmen, kıllar sadece biyolojik açıdan anlamlı olan, yani çevre tarafından değil, av ya da avcı tarafından üretilen frekanslara yanıt verdiği için. Ayrıca kılların dibindeki mekanoreseptörler kılların kendisine göre daha az duyarlıdır ve ateşlenmeleri için daha güçlü bir uyarı gerekir. Son olarak, örümcek hiçbir zaman tek bir kılın uyarılmasıyla harekete geçmez. Hayvanlar nadiren tek bir mekanoreseptörün heyecanlı vızıltısına tepki verir. Onun yerine tüm koroyu dinlerler.

Öyleyse neden kılların her biri bu kadar duyarlı? Bunun bariz açıklaması, avcılarla av arasında uzun süredir devam eden silahlanma yarışının mümkün en zayıf sinyalleri tespit eden sensörlerin evrimine yol açmış olmasıdır. "Fakat bu biraz kolaya kaçan bir yanıt ve ben tamamen

* Bu beceri, Örümcek Adam'ı tehlikelere karşı uyaran örümcek duyusunu andırır. Bazı filmlerde örümcek duyusu Peter Parker'ın kolundaki kılların diken diken olmasıyla temsil edilir. Fakat Roger Di Silvestro'nun, Ulusal Yaban Hayatı Federasyonu'nun blogunda yazdığı gibi "Örümcekler tehlikenin yaklaşmakta olduğunu, göz denen erken uyarı sistemiyle saptayabilir."[97]

ikna olmuş değilim," diyor Casas. Bir biyolog olarak optimizasyondan, yani hayvanların karşılaştıkları birçok kısıtlama göz önüne alındığında ellerinden gelenin en iyisini yaptığından söz etmeye alışkın. Ancak cırcırböceği kıllarının, *azamileştirmenin* nadir bir örneği olduğunu söylüyor. "Daha iyi olmaları neredeyse imkânsız ve bu şaşırtıcı. Kimse bunun gerçek nedenini bilmiyor."*

Böcekler, örümcekler ve kabuklular (krustase) gibi çeşitli hayvan gruplarını içeren eklembacaklılarda su ya da hava akımını saptayan kıllar bulunur. Böylesine yaygın olan bu duyunun önemli etkilerini yeni yeni anlamaya başladık. Örneğin 1978'de Jürgen Tautz, tırtılların, asalak eşekarılarının uçarken oluşturduğu hava hareketlerini göğüs bölgelerindeki kıllarla hissedebildiğini gösterdi.[99] Tırtıllar bu hava hareketlerine donakalma, kusma ya da yere düşmeyle tepki vermişti. Tautz, otuz yıl sonra balarılarının da uçarken aynı etkiyi yaratabildiğini gösterdi.[100] Arılar, ziyaret ettikleri bitkilerin etrafındaki havayı hareket ettirerek, aç tırtılların yol açabileceği hasarı azaltabilir. Bitkiler açısından pek az böcek arılar ve tırtıllar kadar önemlidir. Buna rağmen, en hafif esintilerin ve kıllardaki en ufak sapmaların, bu iki grubu –polinatörler ile yağmacıları– birbirine nasıl bağladığını hiç kimse takdir edememişti. Etrafımızdaki hava, saptayamadığımız sinyallerle doludur. Aynı şekilde, ayağımızın altındaki zemin de.

* Bu hava akımı duyusu, sıklıkla tarif edildiği şekliyle uzaktan dokunma mı sayılır? Yoksa hava hareketlerine yanıt veren kılların rol oynadığı işitme duyusunun bir biçimi midir? Bu konuda iki farklı görüş var. Casas, hava akımı duyusunun her ikisinden de unsurlar barındırdığını düşünüyor. Barth ise kendine has apayrı bir duyu olduğuna inanıyor. Şahsen ben, sınıflama yapmak için hayvanların gerçekten ne deneyimlediğini daha iyi bilmek gerektiğini düşünüyorum. Bir örümcek, uzakta uçan bir sineğin yarattığı hava akımı ya da bacağına telin değmesi karşısında ne hisseder? Bu ikisi, bizim için sıcak ve soğuk gibi birbirinden farklı hisler midir yoksa aynı dokunsal duyumsama spektrumunun iki farklı ucu mu?

7.

Dalgalanan Zemin

Yüzey Titreşimleri

Karen Warkentin'ın rüyası 1991'de gerçek olmuştu. Kurbağaları ve yılanları seven Warkentin, çiçeği burnunda bir doktora öğrencisi olarak kendini her ikisinin de bol bulunduğu Costa Rica'daki Corcovado Ulusal Parkı'nda bulmuştu. Göl kenarında oturup limon yeşili vücudu, turuncu ayakları, elektrik mavisi baldırları, sarı çizgili böğrü ve domates rengi pörtlek gözleri olan kırmızı gözlü ağaç kurbağalarını gözlemliyordu. Dişi kurbağa bir gecede yaklaşık yüz yumurta bırakır ve bunları jöleyle sarıp suya sarkan yapraklara yapıştırır. Fakat yumurtaların neredeyse yarısı kedi gözlü yılanlara yem oluyordu. Kalan yumurtalardan altı yedi gün sonra çıkan iribaşlar suya –bazen de Warkentin'ın üstüne– düşüyordu. "Sahadayken iribaşların saçınıza başınıza ya da defterinizin üstüne düşmesi doğal," diyor. "Bir keresinde bir yumurta öbeğine tosladığımda birkaç embriyonun hızla yumurtadan çıkıverdiğini gördüm."

Tuhaf bir durumdu. İribaşlar, Warkentin'ın kazara kırdığı yumurtalardan pasif olarak atılmamıştı. Âdeta firar etmişlerdi. Warkentin çarpınca bunu yapabiliyorlarsa saldırıya geçen bir yılandan da aynı şekilde kaçabilirler miydi? Yılanın çenesini açıp kapadığını hissedince şanslarını suda denemeye karar verebilirler miydi? Warkentin'ın bilimsel bir toplantıda sunduğu bu fikir şüpheyle karşılandı. Kurbağa yumurtaları, belli bir programa göre çatlayan, çevresinden habersiz, edilgen varlıklardı. "Bazıları bunun çılgınca bir fikir olduğunu düşündü," diyor Warkentin. "Bense sınanabilir olduğunu düşündüm."

Topladıkları yumurta kümelerini, kedi gözlü yılanlarla birlikte açık havadaki kafeslere yerleştirdiler.[1] Yılanlar gece hayvanları olduğundan Warkentin onları gece boyu kontrol etmek zorundaydı. Kafeslerin hemen yanındaki binada bir kanepede yatıyor, bulut gibi sivrisinekler yüzünden acı çekiyor, on beş dakikada bir kalkıp yumurtaları uyku sersemi kontrol ediyordu. İşi zordu ama haklıydı: Embriyo halindeki iribaşlar, saldırıya uğradıklarında yumurtadan erken çıkabilir. Hatta Warkentin, bir yılanın ağzındaki yumurtalardan bile fırladıklarını görmüş.

Warkentin o günden beri bu davranış üzerinde çalışıyor. Neyse ki artık araştırmalarında kaşıntılı geceler daha az, kızılötesi kameralar daha çok yer tutuyor. Bana, kedi gözlü yılanı ağaç kurbağası yumurtalarına saldırıp birkaç yumurtayı ağzına alırken gösteren yeni çekilmiş bir videoyu izletti. Yılan, ağzını jöleden çekip çıkarmaya çalışırken kıvrım kıvrım kıvranan embriyolar, yüzlerinden yumurtayı hızla parçalayan bir enzim salgılıyordu. İçlerinden biri suya atladı. Peşinden de bir başkası. Biraz sonra iribaşlar teker teker sayılamayacak kadar süratli yuvarlanmaya başlıyordu. Hâlâ ilk ağız dolusu yumurtayı çiğnemekle uğraşan yılansa içi boşalmış jöleyle baş başa kalıyordu. "Bunu seyretmekten hiç bıkmıyorum," dedi Warkentin.

Yaptığı deneyler, kurbağa embriyolarının düşünüldüğü kadar çaresiz ya da çevrelerinden habersiz olmadığını gösterdi.[2] Embriyonun duyusal baloncuğu, içinde hapsolduğu gerçek baloncuğun sınırlarını aşar. Işık, yarı saydam yumurtaya girebilir, kimyasallarsa yumurtadan dışarı çıkabilir. Ama asıl önemlisi, titreşimlerdir. Bunlar yumurtaların içine ve embriyolara ulaşır. Embriyolar tehlikeli ya da zararsız titreşimler konusunda hiç tecrübeleri olmadığı halde ikisini ayırt edebilir. Yılanın tek bir ısırığı yumurtaların çatlamasını tetikler. Ama yağmurun, rüzgârın ve ayak seslerinin böyle bir etkisi olmaz. Hatta Warkentin'ın gölü hafif bir depremle sallandığında bile embriyolar tepki vermemiş. Farklı titreşimleri kaydedip yumurtalara çalan Warkentin, embriyoların ses perdesini ve ritmi hemen tanıdığını gösterdi.[3] Yağmur damlaları, yüksek frekanslı kısa titreşimlerden oluşan bir pıtırtı çıkarır. Saldırıya geçen yılanlar, uzun çiğneme seanslarının sessiz aralarla bölündüğü, daha düşük frekanslı ve karmaşık örüntüler oluşturur. Warkentin, yağmur sesini daha yılansı kılmak için kayda bu sessiz boşlukları eklediğinde,

iribaşlar daha çok korkmuş, yumurtadan çıkmaya daha fazla meyletmiş. İribaşların dış dünyayı, daha oraya adım atmadan sezdiği ve bu bilgiyi kendilerini korumak için kullanabildikleri ortada.[4] İribaşlar irade sahibidir. Onların bir Umwelt'i var.

"Geliştikçe giderek daha fazla duyuya ve daha fazla bilgiye kavuşurlar," diyor Warkentin. Embriyolar iki günlükken, ortamdaki oksijen düzeylerini saptayabilir ve bu bilgi sayesinde yumurtaların kazara suya düşüp düşmediğini anlar. Ancak dört günlük olana dek yılanlara tepki vermezler çünkü Warkentin'ın öğrencisi Julie Jung'un keşfettiği üzere, kurbağanın iç kulağındaki titreşim sensörleri bu dönemde devreye girer.[5] Daha öncesinde de tehlikeden kaçabilirler ama bunu hissetmek gibi bir şansları yoktur.* Yılanlar henüz Umwelt'lerinin bir parçası haline gelmemiştir. Fakat saatler içinde her şey değişir: Yeni bir duyu devreye girer ve daha önce farkında bile olmadıkları titreşimler âlemi yaşamlarını değiştirir.

İribaşlar ergin kurbağaya dönüşüp üremeye hazır olduklarında, erkekler eş bulmak için rekabete girer. Onları kızılötesi kameralarla izleyen Warkentin ve meslektaşı Michael Caldwell, erkeklerin bir dal üzerinde saldırmaya hazır beklerken vücutlarını yukarı kaldırıp popolarını kuvvetle salladığını gördüler.[7] Amaç bu gösterilerin görsel açıdan etkileyici olmasıdır ama kurbağalar görüş hatları kapalıyken de performansa devam eder. Birbirlerini görmeseler de rakibin sallanan poposunun yarattığı titreşimleri *hissedebilir*, bu titreşimlerden yararlanarak rakibin boyutlarını ve motivasyonunu değerlendirebilirler. Bu çekişmelerde kazanan taraf genellikle daha uzun süre sallanan ve daha uzun süreli titreşim oluşturabilen kurbağalar olur.†

---

* İribaşlar sallanınca iç kulaktaki küçük kristaller, dokunmaya duyarlı tüy hücrelerine yaslanır ve bu hücreler beyne sinyal gönderir. Aynı iç kulak sisteminin kontrol ettiği bir refleks, iribaşın gözlerini, başın tersi yönde hareket ettirerek bakışlarını sabitler. O nedenle Jung iribaşları döndüren derme çatma bir alet tasarladı.[6] Tüplere yerleştirdiği iribaşları yavaşça çevirirken gözlerinin dönüp dönmediğini izleyerek, iç kulağın tam olarak ne zaman titreşimlere duyarlılık kazandığını hesaplayabildi.

† Hatta Caldwell, erkekleri, elektrikli çalkalayıcının üzerine yerleştirdiği bir kurbağa mankeniyle kışkırttı. Diğer erkekler bu Robokurbağa'nın titremesine saldırgan sinyallerle karşılık verdi. Buna karşılık Robokurbağa'nın gönderdiği titreşimsiz görsel sinyaller umurlarında olmadı.

Bu haberleşme yöntemini muhtemelen başka hayvanlar da kullanır. Erkek kemancı yengeçler eş bulmak için devasa kıskaçlarını kuma vurur.[8] Asker termitler diğer askerleri çekmek için yuvanın duvarlarına kafa atarak alarm titreşimleri oluşturur.[9] Göl yüzeyinde kayarak giden bir böcek grubu olan suda koşanlar, titreşime duyarlı yırtıcıları celbeden dalgacıklar yaratarak eşlerini sekse zorlayabilir.[10] Tüm bu canlılar, ister dal olsun ister kumsal, bulundukları ortamda yüzey boyunca ilerleyen titreşimler yaratır ve bunlara yanıt verir. Biliminsanları bunları substrat kaynaklı titreşimler olarak adlandırır.[11] Günlük dildeyse kısaca titreşim ya da belki titreme veya yüzey dalgaları diyebiliriz.*

Kimilerine göre bu yüzey titreşimleri (ayrıca gezgin örümcekleri ve cırcırböceklerini uyaran hava akımı örüntüleri) "ses" sayılır. Bu mantıkla önceki bölümün ikinci yarısında anlattıklarım ve bu bölümde anlatacağım her şey, "işitme" başlığının kapsamına girer. Bu ayrımın benim açımdan bir önemi yok. O yüzden derleyip toplayanlardansanız ikisini tek bir bölümmüş gibi okuyabilirsiniz; ayırmayı seviyorsanız her birini üç ayrı bölüm olarak düşünebilirsiniz. Öyle ya da böyle, bu uyaranların arasında pek çok örtüşme olduğu gibi, fiziksel özellikleri arasında, hangi hayvanların dikkatini çekeceğini ve o türlerin bu bilgiyle ne yapacağını belirleyen önemli farklılıklar bulunduğunu unutmayın.

Örneğin, hava kaynaklı ses dalgaları hareket yönünde salınım yapar. Bir stres yayını çekip bıraktığınızı hayal edin. Yüzey dalgalarıysa tersine, hareket yönüne dik salınım yapar;[12] stres yayını aşağı yukarı salladığınızı düşünün. Bu salınımlar, su yüzeyindeki dalgalanmalar kadar aşikârdır. Daha az görünür olmakla birlikte katı zeminde de ortaya çıkar. Yere bir taş attığınızda, hafif bir dalga yüzey boyunca yayılır. Yeterince hassas bir hayvan, ayaklarının altında zeminin inip kalktığını hissedebilir. Birçok hayvan yeterince hassastır ama insan öyle değildir. Çoğumuz, hoparlörden gelen bas sesler ya da cep telefonunun titreşimi dışında, diğer türlerin haberdar olduğu zengin titreşim ortamının farkına varmayız. Yüzey titreşimlerini hava kaynaklı seslerden ayırmanın

* Bu konudaki terminoloji biliminsanları için bile biraz çetrefildir. Birçok biliminsanı, günlük dilde kullandığımız *titreşimler* sözcüğünü kullanırken substrat kaynaklı titreşimlere atıfta bulunur. Oysaki bu terim teknik olarak sesleri de kapsar. Mühendisler kusura bakmasın ama dehşete kapılacaklarını bile bile ben de aynısını yapacağım.

güç olabilmesi işleri daha da zora sokar. Hayvanlar çoğu zaman, toprakta ve havada eşzamanlı titreşimler oluşturur. Ayrıca hayvanlar her iki dalga türünü de genellikle tüylü hücreler ve iç kulak gibi aynı reseptör ve organlarla saptar. Kesinlikle ortak bir kelime dağarcığı kullandıklarından bahsedebiliriz: Hayvanların, işitilmez olsalar bile titreşimlere "kulak kabarttıkları" söylenir.

Yüzey titreşimleriyle sesler arasındaki belki de en önemli ayrım ilkinin büyük ölçüde, hatta duyular üzerinde çalışan biliminsanları tarafından bile göz ardı edilmesidir. Araştırmacılar öteden beri hayvanların çeşitli uzuvlarını bir yerlere vurduğunu, salladığını ve titrettiğini gördükleri halde hareketlerin oluşturduğu yüzey dalgalarını göz ardı ederek, bunları görsel ya da işitsel sinyaller olarak yorumladılar. Her kırmızı gözlü ağaç kurbağası dört buçuk günlük olduğunda, biliminsanlarının nicedir görmezden geldiği bu duyusal dünyanın farkına varır. Ekolog Peggy Hill, "Onunla karşılaştık ama onu aramıyorduk ki," diye yazmıştır.[13] Duyu biyologları dahil herkesin ciddiye alması gereken bir ders bu: Önyargılarımıza teslim olursak burnumuzun dibindekini kaçırırız. Ve kaçırdığımız şey bazen nefes kesicidir.

Missouri eyaletinin Columbia şehrinde bir laboratuvarda, bir kene yoncası [*desmodium*] bitkisini seyrediyorum. Yaprağının üzerinde, bir suikasta kurban gitmek üzereymiş gibi kırmızı, noktasal bir ışık parlıyor. Bu kırmızı nokta, lazerli titreşimölçerden kaynaklanıyor. Cihaz, yaprağın yüzeyinde yayılan, işitemediğimiz titreşimleri işitilebilir seslere dönüştürüyor. Masaya dokunup bitkiyi sallayınca güçlü bir gürleme duyuyorum. Hoparlör, konuştuğum zaman ağzımdan çıkan ses dalgalarının yaprakta oluşturduğu yüzey dalgalarını yeniden ses dalgalarına çeviriyor. Kendi sesimin, bitki aracılığıyla iletilen halini duyuyorum. Gerçi kimse benim sesimle ilgilenmiyor. Rex Cocroft ile öğrencisi Sabrina Michael daha çok, yaprağın üzerindeki minik yaratıkla ilgileniyorlar. Bu bir ağaçpiresi, bitkinin özsuyunu emen bir böcek. Büyük, turuncu gözleri, başının altından sakal gibi çıkan bacakları, deniz kabuğununkine benzer açıklı koyulu desenleri var. Bu türün adı *Tylopelta gibbera* ve günlük dilde kullanılan resmî bir adı olmasa da Cocroft hemen bir isim uyduruyor: Kene yoncası ağaçpiresi.

Cocroft'la kitabın giriş bölümünde, hocası Mike Ryan'ı bazı ağaçpirelerini göstermek için Panama yağmur ormanlarına götürdüğünde tanışmıştık. Üzerinden yirmi yılı aşkın zaman geçmiş olmasına rağmen Cocroft bu böceklere ve aralarındaki mesaj alışverişine hâlâ hayranlık duyuyor. Bu böceklerin karın kaslarını hızlı hızlı kasarak yarattığı titreşimler, üzerinde durduğu bitki boyunca ilerleyip başka ağaçpirelerinin bacaklarına ulaşır.[14] Bu titreşimler normalde sessizdir ama bir titreşimölçerle onları işitilebilir seslere çevirmek mümkün. Cocroft, Michael ve ben neredeyse gülünç denebilecek bir beklentiyle minik ağaçpirelerinin üzerine eğiliyoruz. Derken bir böcekten çıkması beklenmeyecek bir uğultu duyuyoruz. Şaşırtıcı derecede derinden gelen, evcil bir kediden çok, bir aslanın mırlamasını andıran bir ses bu.

"İşte başlıyoruz," diyor Cocroft sevinçle.

"İyi iş çıkardın, ahbap," diyor Michael.

Bitkiler sağlam, esnek ve yaylanabilir olduğundan, yüzey dalgalarını mükemmelen iletebilir.* Böceklerse bu özelliklerden faydalanarak bitkileri titreşen nağmelerle inletir.[15] Cocroft'ın tahminine göre ağaçpireleri, yaprakpireleri, ağustosböcekleri, cırcırböcekleri, çayır çekirgeleri ve diğer böcekler arasında yaklaşık 200 bin tür, yüzey titreşimlerini kullanarak iletişim kuruyor. Normal koşullarda duyamadığımız için çoğumuz bu titreşimlerin farkında bile değiliz. Farkına varanlarsa çoğunlukla müptelası oluyor.

Cocroft ilk tecrübesini hatırlıyor. Hayvan iletişimiyle ilgilenen genç bir öğrenciyken, yeterince araştırılmadığı ve pek az bilindiği için ağaçpirelerine odaklanmaya karar vermiş. Ithaca'daki bir arazide *Publilia concava* ile kaplı bir altınbaşak bitkisi bulmuş. Bitkinin gövdesine bir temaslı mikrofon takıp kulaklıkla dinlemiş. "Çok geçmeden *vuu-vuu-vuu-vuu* diye bir ses duydum," diyor, hüzünlü bir boğa kurbağasını taklit edercesine. "Daha önce hiç kimsenin duymadığı müthiş bir sesti ve tam da arka bahçemdeydi. O anda her şey değişti. Bence bu titreşim

* Burada "yüzey dalgaları" terimini kullanmak doğru değil aslında. Bir dalga, bitki sapı ya da örümcek ağının ipliği gibi ince, uzun bir yapıda yol alırken yüzey dalgalanmaz. Onun yerine, yapının kendisi eğilip bükülür; o nedenle bunlara fleksüral dalga (*bending wave*) denir. Terimler arasında boğulmamak için bunu sadece dipnot olarak veriyorum.

dünyasının farkına varan hiç kimse cazibesine karşı koyamaz. Ama bazıları öylesine büyülenir ki dışarı çıkıp başka türleri kaydetmek ister. Dışarıda bundan çok daha fazlası var. Sonsuz bir çeşitlilik."

Cocroft'ın ağaçpirelerinin kayıtlarından oluşan bir kütüphanesi var.[16] Kayıtları çalınca şaşkınlıktan dilim tutuluyor. Sesler unutulmaz, büyüleyici ve şaşırtıcı. Cırcırböceklerinin ya da ağustosböceklerinin çıkardığı tiz seslerle uzaktan yakından ilgisi yok; daha çok, kuş, maymun, hatta makine ya da bir çalgı sesine benziyor. Genellikle derin ve melodik sesler ve muhtemelen böceklere de öyle geliyor. *Stictocephala lutea*'nın ötüşü cızırtılı bir "didgeridoo"* sesini andırıyor. *Cyrtolobus gramatanus*'unki bir maymunun soluklu bağırışıyla mekanik tıkırtıların karışımı gibi. *Atymna*'nın çıkardığı sesler geri geri giden bir kamyonun verdiği uyarı sinyaliyle davul sesinin karışımını andırıyor. *Potnia*'nın çıkardığı sıradan motor gürültüsüne gafil avlanıp devamında gelen möleme ve çığlık arası sesle afallıyorum. Cocroft bu sesi ilk duyduğu ânı şöyle anlatıyor: "Arkama yaslanıp düşündüm: Daha neler! *Bu sahiden böcek mi?*"

Bu titreşimsel şarkıların böylesine tuhaf olmasının sebebi, hava kaynaklı seslerle aynı fiziksel kısıtlamalara tabi olmamalarıdır. Bir hayvanın çıkardığı sesin perdesi normalde hayvanın büyüklüğüne bağlıdır; o nedenle fareler böğürmez, filler ciyklemez. Bu kısıtlama yüzey dalgaları için geçerli olmadığından, küçük hayvanlar, çok daha büyük bedenlerden çıkıyormuş izlenimi veren düşük frekanslı titreşimler üretebilir. Bir ağaçpirelerinin çiftleşme çağrısı, kendisinden milyonlarca kat ağır bir alligatorun çağrısı kadar düşük frekanslı olabilir.[17]

Hava kaynaklı seslerin bir diğer kısıtlılığı, dışa doğru üç boyutlu yayılmalarından ötürü çok çabuk enerji kaybetmeleridir. Böcekler, bütün çabalarını çok dar bir frekans aralığına odaklayarak çıkardıkları kısa cırlamalarla bunu telafi etmeye çalışır. Fakat yüzey dalgaları yalnızca düz bir rotada ilerlediğinden, enerjisini daha uzun mesafeler boyunca koruyabilir. Bu kanaldan sinyal gönderen böcekler daha yaratıcı olabilir; melodik iniş çıkışlar, yığınla nota ve biteviye tekrarlanan ritimler üretebilir. O nedenle sesleri daha çok kuş ötüşünü andırır.

* Avustralya yerlilerinin geliştirdiği bir üflemeli çalgı. (*e.n.*)

Üç bini aşkın türü olan ağaçpireleri, yüzey dalgalarını çeşitli biçimlerde kullanır.* Bazı yavrular, bir yırtıcının varlığını hissettiklerinde annelerine seslenmek için eşzamanlı titreşimler üretir.[18] Bazı anneler, yavruları susturan titreşimler oluşturur; aksi takdirde onların telaşlı titremeleri yırtıcıları daha da fazla çeker.[19] Cocroft'ın laboratuvarında gördüğüme benzer kene yoncası ağaçpireleri yüzey dalgalarını bir araya gelmek için kullanır. İçlerinden biri mırlar ve diğeri menzildeyse keskin bir tıklamayla yanıt verir. İkili, birbirini bulana dek karşılıklı "Marko" ve "Polo" diye bağıran çocuklar gibi mırlayıp tıklayarak birbirine yaklaşır. Kur yaparken de benzer bir yol izlerler.[20] Erkek titreşimsel bir mızırdanmanın ardından bir dizi tiz vuru yapar. Çiftleşmeye hazır bir dişi onu duyarsa erkeğin çağrısı biter bitmez pes bir uğultu çıkarır. Erkek bu sese göre dişinin yönünü tayin eder, ona biraz daha yaklaşır ve tekrar mızırdanır. Dişi yine uğuldar ve düet yapan ikili adım adım yaklaşarak birbirini bulur. Ancak aynı bitki üzerinde ikinci bir erkek daha varsa ilk erkeğin mızırdanması biterken o da bir mızırdanma koyuverir ve bunun üzerine dişi susar. İlk erkek bir sonraki mızırdanmasının zamanlamasını rakibinin çağrısını kesecek şekilde ayarlayarak misilleme yapar ve ikili bu şekilde birbirinin sözünü kesmeye devam eder. "Birden fazla erkek varsa bir dişi bulmaları uzun sürebilir," diyor Cocroft.†

Yüzlerce ağaçpiresi tek bir bitki üzerinde toplanabilir ve birçoğu aynı anda titreşim yayabilir. İmdat haykırışları, sessiz olun ikazları, davetkâr ya da seksi çağrılarla çınlayan bir bitkinin gövdesi, kalabalık bir cadde kadar gürültülü olabilir. Ağaçpirelerini şimdiye dek hiç duymamış olabilirsiniz ama doğada zaman geçiriyorsanız titreşimsel serenadının farkına varmamış olsanız da birinin yanında mutlaka oturmuşsunuzdur. Dahası, ağaçpireleri, titreşim korosundaki pek çok hayvanın

---

* Cocroft çoğu zaman, kaydettiği titreşimleri ağaçpirelerini dinletip böceklerin yapay seslere nasıl tepki verdiğine bakarak farklı titreşimlerin ne işe yaradığını çözmeye çalışıyor. Bir keresinde kız kardeşi bundan bahsedince arkadaşı şunu sormuş: "Böceklere yalan mı söylüyor?"

† Düet yapan pek çok böcek birbirinin sinyalini keser ve biliminsanları bu davranışı tarım zararlılarını kontrol etmek amacıyla kullanabilir.[21] Üzüm bağlarına gerili tellerde doğru titreşimleri oluşturarak, hastalık yayan yaprakpirelerinin cinsel yaşamını söndürebilirler.

sadece bir grubudur. Maskeli huş ağacı tırtılları, anüslerini yapraklara sürterek diğer tırtılları toplanmaya çağırır.[22] Akasya karıncaları çiğneme titreşimleri hissedince yuvalarının bulunduğu ağaçları, yaprak yiyen memelilere karşı cansiperane savunur.[23] Çağrılarını duyabildiğimiz türler bile genellikle duyamadığımız titreşim sinyalleri gönderir. Cocroft bana, cırıldayan ağustosböceklerinin inek, çayır çekirgelerinin devri yükseltilen hızar gibi ses çıkardığı başka kayıtlar da dinletiyor. "Doğa zaten öylesine zengin görünüyor ki bir de bu inanılmaz zenginlik karşısında iyice hayret ediyorum," diyor.

Bu zenginliğin içine dalmak, bir lazerli titreşimölçeriniz olmasa bile şaşırtıcı derecede kolay. 1949'da, bu tür aletler icat edilmeden otuz yıl önce, alanında öncü İsveçli bir entomolog olan Frej Ossiannilsson, yaprakpirelerini çimen yapraklarının üzerine ve yaprakları da deney tüplerine koyduktan sonra kulağına yaklaştırdığında titreşimleri duymuştu.[24] Keman çalma eğitimi almış olan Ossiannilsson, duyduklarını notaya döktü. Cocroft, bugün o sesleri duymak için ucuz bir hoparlör ve bir gitaristin kullanabileceği türden yaka mikrofonuna bağlı bir dijital ses kayıt cihazı kullanıyor. Boş zamanlarında bu düzenekle civardaki parklarda, hatta arka bahçesinde dolaşırken bitki saplarına, yapraklara ve dallara rasgele mikrofon takıp titreşimleri kaydediyor. Çoğu zaman yeni bir şey duyuyor. Bana da göstermesini rica ediyorum.

Arabayla laboratuvarına birkaç dakika mesafedeki bir parka gidiyoruz. Cocroft ile öğrencileri, uzun otlarla kaplı, güneşli bir noktada diz çöküp mikrofonları bitkilere iliştirmeye başlıyorlar. Bir süre hiçbir şey duymuyoruz. Eylül bitmek üzere ve titreşim şarkılarının mevsimi geçiyor. Şiddetli rüzgârların sesi her şeyi bastırıyor. Yürüyen bir tırtılın ayak seslerini, bir kınkanatlının yaprağın üzerine küt diye indiğini duyabiliyorum ama bizzat tecrübe edeceğimi umduğum o etkileyici melodilerden eser yok. Hüsranla sonuçlanan bir yarım saatin ardından Cocroft özür diliyor. Ama tam bugünlük bu kadarı yeter diyeceğimiz anda, öğrencilerinden Brandy Williams bize sesleniyor. "Burada hakikaten hoş bir şey var."

Yanına gidiyoruz ve hoparlörden gelen ses… kıs kıs gülmeye mi benziyor? Sanki "eh, eh, eh, eh, eh" diyor. Böcekten çok sırtlan sesini andırıyor. "Eh, eh, eh, eh, eh." Williams mikrofonu rasgele bir otun dibine takmış; üzerinde böcek göremiyoruz. Ama orada kesinlikle bir

böcek var. "Eh, eh, eh, eh, eh." Ağaçpireleri ve diğer böceklerin titreşim dünyasına o kadar az kişi kulak verir ki herhangi bir denemede daha önce hiç duyulmamış bir ses yakalama şansınız olur. Cocroft'a bu esrarengiz kıs kıs gülüşü daha önce duyup duymadığını soruyorum. "Buna *benzer* sesler duydum," diyor, "ama bunu duydum mu… gerçekten bilmiyorum. Dışarıda o kadar çok tür var ki."

Tatmin bularak arabaya dönüyoruz. Birdenbire, yanından geçtiğimiz tüm bitkilerin arasında titreşen korolar olabileceğinin farkına varıyorum. Her adımda yarattığımız titreşimleri, ayağımız yere her bastığında zeminde oluşan yüzey dalgalarını düşünüyorum. Ayağımızın altında incecik dalların çıtırtısını, vıcık vıcık çamurda yürürken çıkan yumuşak ayak seslerini duyabiliyorsak da adımlarımızın oluşturduğu sarsıntıları fark edemiyoruz. Ama başka canlılar fark edebiliyor.

Mojave Çölü'ne geceyle birlikte sessizlik çöküyor. Ara sıra bir kır kurdunun uluması ya da uzaktan geçen bir uçağın gürültüsü dışında ortalık sessiz. Fakat kum tepeleri titreşimlerle uğulduyor. Yiyecek peşinde koşan böceklerin minicik ayakları kumda ilerleyen titreşimler yaratıyor. Bu dalgalar son derece zayıf ve kısa ömürlü. Öte yandan, kum akrebinin hissedebileceği kadar güçlüler.

Kum akrebi Mojave'nin en yaygın sakinlerindendir ve başka kum akrepleri dahil, yakalayıp soktuğu her şeyi yer. Philip Brownell ve Roger Farley 1970'lerde, kum akrebinin elli santimetrelik menzil içinde yürüyen ya da kuma iniş yapan her şeye kolayca saldırdığını fark etmişlerdi. Brownell, "Kumu ince bir dalla hafifçe karıştırmak da şiddetli bir saldırı başlatıyordu," diye yazmıştı *Scientific American* dergisinde, "ama birkaç santimetre uzağında, havadaki bir güvenin çırpınışları, akrebin dikkatini çekmiyordu."[25] Anlaşılan akrep, yüzey dalgalarını kullanarak avının izini sürüyordu.

Brownell ve Farley bu fikri sınamak için akrepleri zekice tasarlanmış bir alana koydular.[26] Zemin düzgün ve kesintisiz görünüyordu ama kumun altındaki bir boşluk, titreşimlerin alanın bir yarısından diğer yarısına geçmesini engelliyordu. Eğer akrep alanın bir yarısında duruyorsa araştırmacılar, hayvanın sadece birkaç santimetre uzağında olsa bile diğer tarafın zeminindeki bir noktayı sopayla dürttüklerinde akrep fark etmiyordu. Fakat bacaklarından biri bile boşluğun diğer tarafına

geçmişse akrep alanın tamamını hissedebiliyor, herhangi bir kıpırtı olduğunda o tarafa dönüyordu.

Akrebin ayaklarında sensörler bulunur.[27] "Bilek" olarak tanımlanabilecek eklemde, dış iskelet keskin bir bıçakla yarılmışçasına sekiz kertik yer alır. Bunlar, bütün araknidlerde bulunan, titreşimleri tespit eden yarık duyu organlarıdır. Her yarığın üzerini, sinir hücresiyle bağlantısı olan bir zar örter. Bir yüzey dalgası akrebe ulaştığında, kabaran kum hayvanın ayaklarını iter. Bu hareket yarıklara son derece küçük bir basınç uygular ama bu kadarı bile zarı sıkıştırmaya ve sinirlerin ateşlenmesine yeter. Kendi dış iskeletindeki en ufak değişiklikleri dahi algılayan akrep, yakından geçen avın adımlarını hissedebilir.

Hisseder hissetmez de avlanma duruşuna geçer.[28] Gövdesini kaldırır, kıskaçlarını açar ve sekiz ayağıyla neredeyse kusursuz bir çember oluşturacak şekilde yere basar. Bu konumda, ayaklarından her birine ne zaman çarptığına bakarak, yüzey dalgalarının nereden geldiğini saptayabilir. Döner, koşar ve durup bir başka dalganın gelmesini bekler. Dalga gelince yine döner, koşar ve her sarsıntıda hedefine biraz daha yaklaşır. Kıskaçları bir şeye çarparsa yakalayıp sokar. Dalgaların kaynağına vardığında bir şey bulamazsa avının yeraltında olduğunu anlar ve onu kazıp çıkarır.

İnançları kökünden sarsan bu keşifler, Karen Warkentin kurbağalı gölü bulmadan ve Rex Cocroft ağaçpirelerini dinlemeye başlamadan on yıl önce yapılmıştı. O dönemde yüzey titreşimlerine yönelik çalışmalar, şimdikine göre daha da az kişinin uğraştığı sınırlı bir alandı. Biliminsanları, hayvanların bu tür titreşimleri hissedebildiğini biliyordu ama kaynağın izini sürme yetilerinin, insanların bir depremin merkez üssünü araç gereçsiz saptama yetisinden daha fazla olduğuna inananların sayısı pek azdı.* Bir hayvanın, gevşek taneleriyle titreşimleri iletmekten

* Hayvanlar depremi önceden hissedebilir mi? Birçok türün, yaklaşan sismik dalgaları saptayabilmesi olası görünüyor ama bu bilgiyi çözümleyip çözümleyemediklerini ya da depremden kaçmak için eyleme geçip geçmediklerini bilmiyoruz. Depremden önce tuhaf davranan hayvanlarla ilgili hikâyeler binlerce yıldır anlatılmakta ama bu tür davranışlar tutarlılık göstermez; ayrıca anlatılanların, gözlemcilerin geriye dönüp baktığında hatırladığı olağandışı bir davranıştan ibaret olup olmadığını anlamak zordur. Depremden önce tesadüfen takip tasması takılmış fillerin ve diğer bazı hayvanların gözlemlendiği birkaç örnekte, sarsıntı başlamadan önce hayvanların hareketlerinde görünüşe göre bir farklılık olmamıştır.[29]

çok, boğan ve soğuran kumda bunu yapabilmesi özellikle akıl almaz görünüyordu. Fakat Brownell ile Farley'nin titizlikle yaptığı deneyler, bu varsayımların yanlış olduğunu gösterdi. Kum, toprak ve sert zemin, yüzey dalgalarını şaşırtıcı derecede iyi iletir ve bu dalgalar, hayvanların tespit edebileceği kadar güçlü, kullanabileceği kadar bilgi vericidir. Ayrıca yüzey dalgaları biliminsanlarının dikkatini çekecek kadar ilginçti. Bazı araştırmacılar diğer hayvanlarda sismik duyular aramaya başlamıştı. Fazla uzağa gitmeleri gerekmiyordu.

Kuzey Amerika'da karalama böceği [*doodlebug*]* adıyla bilinen karınca aslanı larvaları da kumda yayılan yüzey dalgalarını kullanarak avlanır. Fakat kurbanını arayıp bulmak yerine avını kendi ayağına getirir. Kuru kumda konik bir çukur kazar ve tombul gövdesiyle çukurun dibinde, kocaman çenesini açıp pusuya yatar. Bu çukurlar kusursuz birer tuzaktır. Duvarları, çukurun kendiliğinden çökmesine izin vermeyecek kadar sığ ama tuzağa düşen bir karıncanın kaymasına neden olacak kadar diktir. Bir karıncanın ayak sesleri, hayvan debelenirken bile belirgin değildir ama karınca aslanının bedeni, bir nanometrenin altındaki titreşimleri tespit edebilen sert kıllarla kaplıdır.[30] Çukurun dışında yürüyen bir karıncayı hissedebileceği gibi, ne zaman içeri girdiğini de anlayabilir. Debelenen hayvanın üstüne kum atarak yarattığı çığ, zaten kaygan olan zeminin daha da fazla kaymasına neden olur.[31] Sonunda ağzına düşen karıncayı yakalayıp aşağı çeken karınca aslanı zehrini zerk eder. O zaman titreşimler durur.

Bazı yırtıcılar avlanırken, avlarının sismik duyularından faydalanır. Her yıl nisan ayında Florida'nın Sopchoppy kasabasında, eski bir gelenek olan solucan homurtusu [*worm grunting*] şenliği yapılır. 1960'lardan beri süregelen şenlikte, o bölgede yaşayan aileler ormana gidip toprağa diktikleri sopalara ellerindeki demirleri sürter. Oluşan titreşimlerin etkisiyle çok geçmeden yüzlerce iri solucan toprağın üstüne çıkar; kovalar dolusu solucan toplanıp yem olarak satılır. Kimileri bu titreşimlerin yere düşen yağmur damlalarının sesini taklit ettiğine inanıyor. Fakat Ken Catania –yıldız burunlu köstebeği araştıran adam– öyle olmadığını

* Kumda bıraktığı izlerden ötürü böyle adlandırılır. (*ç.n.*)

kanıtladı.[32] 2008'de Sopchoppy Solucan Homurtusu Şenliği'ne katılan Catania, solucanların yağmur damlalarının örüntüsüne pek tepki vermediğini ama toprağı kazan bir köstebeğin titreşimlerini hissettiği, hatta bu titreşimlerin kaydını dinlediğinde bile hızla yüzeye çıktığını gösterdi.. Köstebekler avlarını toprağın üzerinde kovalamadığına göre bu akla yakın bir stratejidir. Ancak yüzeyde avlanan bazı yırtıcılar, zemini titreterek solucanları yukarı çağırabileceklerini öğrenmişler. Belli ki Floridalıların yanı sıra, gümüş martılar ve *Glyptemys insculpta* türü kaplumbağalar [wood turtles] da bunu yapıyor. Meğer şenlikte solucan toplayanlar, yıllardır farkında olmadan köstebeklerin yarattığı sarsıntıları taklit ediyormuş.*

Hayvanlar muhtemelen okyanuslardan karaya çıktığı andan itibaren sismik titreşimleri algılayabiliyordu. Bu hamleyi yapan ilk omurgalılar –ilk amfibiler ve sürüngenler– muhtemelen iri kafalarını toprağa dayayınca yüzey dalgaları çene kemiklerinden iç kulağa ilerliyordu. Memelilerin atalarında bu çene kemiklerinden üçü, yeni bir amaç kazanarak havada yayılan ses dalgalarını iletmeye başladı. Bu kemikler küçülüp yer değiştirdi ve orta kulaktaki küçük kemiklere –çekiç, örs ve üzengi– dönüştü. Artık çene üzerinden yüzey titreşimlerini iletmek yerine havada yayılan sesleri dış kulak ve kulak zarı yoluyla iletiyorlar.

Fakat o kadim kemik iletim yolu hâlâ işe yarıyor: Titreşimler, dış kulak yolunu ve kulak zarını atlayıp kafa kemikleriniz vasıtasıyla doğrudan iç kulağa ulaşabilir. Bisikletçiler ve koşucular, kulağı boşta bırakan kemik iletimli kulaklıklarla müzik dinleyebilir. İşitme sorunu olan kişiler kemik iletimli işitme cihazlarını, işitme engelli dansçılar özel titreşimli dans pistlerini kullanabilir. Ayrıca işitebilen herkes kısmen kemik iletim yolunu kullanır; o yüzden, kayıttan dinlediğimizde kendi sesimiz bize tuhaf gelir. Bu kayıtlar, seslerimizin kafatasımızdan iletilen titreşimlerini değil, havada yayılan bileşenlerini yeniden üretir.

Bazı memeliler, anatomilerinde meydana gelen değişiklikler sayesinde titreşimleri kemik iletimiyle daha iyi hissedebilir hale gelmiş,

* Charles Darwin 1881'de şöyle yazmıştı: "Toprağa vurulur ya da başka şekilde titremesi sağlanırsa solucanlar, peşlerinde bir köstebek olduğunu düşünür ve yuvalarını terk ederler."[33] Yüzyılı aşkın bir zaman sonra Catania, Darwin'in bu ifadesini doğruladı.

atalarının sismik duyusuna yeniden kavuşmuştur. Kuzeybatı Afrika kumullarında yaşayan Namib Çölü altın köstebeği onlardan biridir. Minicik dış kulak yolu kürkünün içinde gizli olduğundan altın köstebek havada yayılan seslere çoğunlukla duyarsızdır. Buna karşılık, orta kulağındaki çekiç kemiği sayesinde titreşimlere çok hassastır.[34] Otuz gramlık bu el kadar köstebeğin çekiç kemiği sizinkinden daha büyüktür.*

Altın köstebek geceleri Namib kumullarında yuvarlanarak ya da küreğe benzer ayaklarıyla gevşek kumda "yüzerek" beslenir.[35] Lezzetli termitlerin aralarına yuva yaptığı seyrek kumul otlarını arar. Peter Narins, bu öbeklerin üzerinde esen rüzgârın, kumullarda yayılan düşük frekanslı zayıf titreşimler yarattığını ve altın köstebeğin başını ve omuzlarını zaman zaman kuma sokarak bu titreşimleri saptayabildiğini öne sürdü.[36] Köstebek bunu her yaptığında titreşimler çekiç kemiği yoluyla iç kulağa iletilir ve kumul otlarının yerini belli eden uğultu kemiğin çevresinde yankılanır.† Altın köstebeğin sismik duyusu o kadar keskindir ki hayvan kör olmasına rağmen birbirinden uzak öbekler arasında neredeyse dümdüz yürüyebilir.

Altın köstebeklerin, kum akreplerinin, karınca aslanlarının ve toprak solucanlarının görme duyusu zayıftır ve hepsi ya toprağa yakın ya da toprağın içinde yaşar. Geriye dönüp baktığımızda, bu hayvanların yerdeki titreşimlere uyum sağlamış olması akla yakın, hatta belki doğal görünüyor. Ancak yerden daha yüksek hayvanlarda sismik duyuyu sezgisel olarak kavrayabilmemiz daha zordur. Örneğin kedilerin karın kaslarında titreşime hassas pek çok mekanoreseptör bulunur. Yere çöküp avına gizlice sokulan bir kedinin tek niyeti saklanmak olmayabilir mi? Avından gelen titreşimleri hissediyor olabilir mi? Bir aslan uzaktaki

---

* Altın köstebekler, adlarına ve görünüşlerine rağmen aslında köstebek değildir. Evrim sürecinde köstebeklerden bağımsız olarak aynı fiziksel özellikler ve yaşam tarzı gelişmiş olmasına karşın bu hayvanlar manatiler, yerdomuzları ve filleri içeren karışık bir memeliler grubuyla daha yakın akrabadır.

† Çekiç kemiği normalde kulak zarından gelen ses titreşimlerini alır ve hareket ederek bunları örs kemiğine iletir. Altın köstebeğin çekiç kemiği o kadar büyüktür ki biraz daha farklı çalışır.[37] Sismik dalgalar köstebeğin kafasına ulaştığında çekiç kemiği çoğunlukla hareket etmez; örs kemiği ve kafatası bu kemiğin etrafında titreşir.

antilopların yerini tam olarak belirleyebilir mi? Peggy Hill, titreşime dayalı iletişim konulu kitabında "Doğa belgesellerinin, aslanların doğuştan tembelliğine atfettiği aylaklık etme hali, aslında akıllıca bir değerlendirme dönemi olabilir," diye yazar.[38] Hill böyle fikirlerin "alkışla ya da alayla" karşılanabileceğini itiraf ediyor ama onun kastettiği şey, bunların sorulmaya değer sorular olduğudur. Sismik duyular uzun süredir ihmal ediliyor ve anlaşılan, en yakından tanıdığımız hayvanların bile gizli bir yönünü ortaya çıkarmaya çalışan biyologların önüne çıkan engel, hep aykırı bir gözlemin eksikliği oluyor.

Caitlin O'Connell, 1990'ların başlarında, nemli, sıkışık, yarı yarıya toprağa gömülü, çimentodan yapılmış sığınağında oturup daracık bir yarıktan dışarıdaki su birikintisini haftalarca izledi.[39] Filleri araştırmak ve onları tarım arazilerinden uzak tutmanın yollarını bulmak için Namibya'daki Etosha Ulusal Parkı'na gelmişti. Derin düşüncelere dalmaya elverişli sığınağından izlediği sürüleri tanıdıkça belli davranışlar gözüne çarpmaya başladı. Bazen bir fil yürürken, uzakta bir şey hissetmiş gibi ansızın donakalıyor, bir ayağının tırnaklarını toprağa dayayıp öne eğiliyordu. Tuhaftı ama bu duruş O'Connell'a tanıdık gelmişti. Lisansüstü öğrencisiyken, ağaçpireleriyle akraba olan bitkipirelerinin titreşim yoluyla iletişimi üzerinde çalışmıştı; onlar da birbirlerinin gönderdiği sinyalleri saptamaya çalışırken öne eğilip bir ayaklarını yere bastırıyordu. Filler de aynısını yapıyor olabilir miydi gerçekten? İçlerinden biri ne zaman bu şekilde dursa çok geçmeden uzakta bir yerde fillerin belirmesi tesadüf olamazdı. Görünüşe göre ayaklarıyla etrafı dinliyorlardı ama bu, hiç kimsenin dikkatini çekmemişti.[40]

O'Connell bu fikri sınamak için 2002'de su birikintisine geri döndü.[41] Orada yaşayan fillerin aslanların tehdidi karşısındaki alarm çağrılarını daha önce kaydetmişti. Çağrı işitilebiliyordu ama O'Connell, yüksek frekansları kesip ayırarak büyük ölçüde sismik bir sinyale dönüştürdüğü çağrıyı, yeraltına gömdüğü titreşimli hoparlörlerden çaldı. Bunu yaptığında bütün sürü donakalıyordu. Sessizleşiyor, temkinli davranıyor, bir araya toplanarak savunmaya geçiyorlardı. Onları gece görüş gözlüğüyle seyreden O'Connell çok sevinmişti. "Onca yıldır hep bu ânı planlıyor, umut ediyor ve hayal kuruyordum," diye yazmıştı *The*

Elephant's Secret Sense adlı kitabında. "Filler, sismik işaretlerimizi saptıyor ve bunlara yanıt veriyordu."[42]

Birkaç yıl sonra aynı deneyi tekrarladı ama bu kez Kenya'daki fillerin yırtıcılar karşısında çıkardığı homurtuların kayıtlarını kullandı.[43] Etosha filleri, aşina oldukları yerel alarm titreşimlerine yanıt verirken, tanımadıkları Kenya fillerinin çağrılarına tepkisiz kaldı. Titreşimlere dikkat etmekle kalmıyor, tanıdık fillerden gelip gelmediğini de anlıyorlardı. O'Connell bir süre önce fillerin başka türlü sismik sinyallere de yanıt verebildiğini gösterdi. Bir videoda, cinsel yönden aktif bir erkek olan Beckham'ın, üreme çağındaki bir dişinin gizli hoparlörden gelen homurtularını duyunca, onu nasıl boşuna arayıp durduğu görülüyordu.*

Peki ya bir zamanlar gezegenimizde yaşamış mamutlar ve mastodonlar gibi fil benzeri diğer yaratıklar? Ya dev yer tembelhayvanları, günümüz bozayılarına tepeden bakacak kadar uzun boylu olan kısa yüzlü ayılar, araba büyüklüğünde armadillolar ya da modern gergedanlardan on kat ağır olan boynuzsuz gergedanlar? Bu megafaunanın nesli tükendi; bunun sorumlusuysa insanlar ve tarihöncesi akrabalarımızdı. Biz dünyaya yayıldıkça en büyük hayvanlar ortadan kalktı.[45] Bu eğilim günümüzde de devam ediyor. İkisi Afrika'da ve biri Asya'da olmak üzere, geriye kalan üç fil türünün de soyları tehdit altında. En büyük kara hayvanları içinde ikinci sırada gelen beyaz ve siyah gergedanlar, zürafalar ve suaygırlarının da başı dertte. Büyük sürüler de azaldı. Bir zamanlar Kuzey Amerika'da binlerce hayvandan oluşmuş gruplar halinde 30-60 milyon bizon yaşıyordu ama Avrupalı sömürgeciler, yaşamı bu hayvanlara bağlı yerli halkları ortadan kaldırmak için bizonları katlettiler.[46] Bugünse geriye, çoğu sınırlı özel arazilerde yaşayan 500 bin

* Birinci Bölüm'de gördüğümüz üzere, filler gibi büyük, güçlü ve zeki hayvanlarla deney yapmak kolay olmadığından, bu hayvanların sismik duyusu büyük ölçüde gizemini koruyor. O'Connell, fillerin gerek çağrılarıyla gerekse yürürken yüzey dalgaları oluşturduğunu gösterdi ama filler bunu bilerek mi yapıyor yoksa bu dalgalar tesadüfi mi? Titreşimler kilometrelerce öteye ulaşabilir[44] ve filler bu dalgaları uzun mesafelerde sosyal grupların eşgüdümünü sağlamak için kullanabilir, evet ama bunu gerçekten yaparlar mı? Bu bilgiyi, civarda hangi fillerin bulunduğunu, onların sıkıntılı ya da saldırgan olup olmadığını anlamak için kullanabilirler mi? Sismik sinyaller muhtemelen Umwelt'lerinin bir parçası ama önemli bir parçası olup olmadığını henüz bilmiyoruz.

bizon kaldı. O toynak ve ayak sesleri olmadan toprağın artık ne kadar sessiz olduğunu varın siz düşünün. Bir zamanlar titanların ayak sesleriyle gümbür gümbür inleyen altı kıtada şimdi cılız sesler yankılanıyor.

Bu sismik sessizleşmenin müsebbibi insanlar, yaşanan kaybı hissediyor mu? Batılı toplumlar, ayakkabılar, koltuklar ve zemin kaplamaları yüzünden ayaklarının altındaki toprakla olan bağlarını büyük ölçüde kopardı. Ayakta durmak yerine, yerde oturarak daha fazla zaman geçirselerdi ne hissederlerdi acaba? Oglala Lakota kabilesi şefi, yazar Luther Standing Bear bununla ilgili bir ipucu vermişti. "Lakotalar (...) dünyayı ve dünyaya dair her şeyi severdi, yaşları ilerledikçe bağlılıkları da güçlenirdi," diye yazmıştı 1933'te. "Yaşlılar toprağı gerçekten severdi; analık kudretine daha yakın oldukları hissiyle toprağa oturur ya da uzanırlardı. (...) Yaşlı bir yerli kendi bedenini destekleyip yaşam veren kuvvetlerden uzaklaşmak yerine hâlâ toprağın üzerinde oturur. Onun için yerde oturmak ya da yatmak, daha derin düşünebilmek ve daha içten hissedebilmek demektir; böylece yaşamın gizemlerini daha net görebilir ve çevresindeki diğer yaşamlara akrabalık bağıyla yaklaşabilir. Dünya, eski zaman yerlilerinin bazen kulağını yaslayarak daha net duyabildiği seslerle doluydu."[47]

Doğal titreşimlerin dünyasıyla aramızdaki o dolaysız bağlantı zayıflamış olabilir ama günümüzde farklı bir titreşim ortamı ortaya çıktı. Cildimizin üstünde ve parmak uçlarımızda vızıldayan modern cep telefonları bizi son dakika haberleri, yaklaşan etkinlikler ve sosyal ilgi hakkında uyarıyor. Cihazlarımız bizi titreşimler yoluyla bedenlerimizin ötesindeki dünyaya bağlıyor, Umwelt'imizi anatomimizin erişemeyeceği noktalara genişletiyor. Ancak her seferinde olduğu gibi, bu kez de başka bir hayvan grubu oraya bizden önce ulaşmıştı.

"İçerisi bayağı iğrenç, uyarmadı deme," diyor Beth Mortimer. Ama yine de hazırlıksız yakalanıyorum.

Mortimer'a altın ipek küre örücü örümcek [*Nephila*] kolonisini görmek istediğimi söylerken, her biri bir örümceğe ayrılmış bir dizi kafesle karşılaşacağımı düşünmüştüm. Onun yerine ağır bir kapıdan ve geniş plastik şeritlerden yapılmış bir perdeden geçip bir zamanlar kuşhane niyetine kullanılmış, şimdiyse otuz kırk civarında salma örümceğe

yuvalık yapan geniş bir odaya giriyoruz. Mortimer ve ben, bir metre çapında karman çorman ağlara dolanmamak için örümcek odasının ortasında duruyoruz. Ağları görmek zor ama merkezlerinde duran büyük örümceklere bakarak nerede olduklarını kolayca kestirebiliyorum. Örümcekler kulağım kadar. Doğadaki altın ipek küre örücü örümcek ağları, yarasaları yakalayacak kadar büyük ve sağlam olabilir. Ama bu odadaki örümcekler sinekle besleniyor ve sinekler de tıpkı örümcekler gibi odada serbest. İğrenç olansa şu: Sinekler köşedeki, çürük muz ve süt tozuyla dolu kompost kovasında ürüyor. Mortimer bana bundan ve örümcek ipeğiyle ilgili çalışmalarından söz ederken, saçıma, not defterime ve kalemime konan göksineklere aldırmamaya çalışıyorum. "Lisans öğrencilerini buraya getiriyorum ama maalesef mideleri fazla hassas," diyor Mortimer.

Gözleri manzarayı bütünüyle tarayabilen ve ipeksi ağları hemen hemen seçebilecek kadar keskin olan insanlar için bu oda, sinekleri tuzağa düşürmeyi bekleyen bir ölüm labirentidir. Görme yetisi çok zayıf olan örümcekler içinse aslında oda falan yoktur: Sadece ağ ve ağı titreştiren şey vardır. Sinekler, kıskıvrak yakalanana kadar incecik ağları algılayamaz. Onlar için neredeyse üzülüyorum. "Ben üzülmüyorum," diyor Mortimer. "Sineklerden nefret ederim." Ama örümceklere bayılıyor, en çok da altın ipek küre örücü örümceğine. Suda koşanlar, bitkipireleri ve filler gibi titreşimleri hisseden başka hayvanları da araştırıyor. Ama bilimsel kariyerine başladığında üzerinde ilk çalıştığı hayvan olan altın ipek küre örücü örümcek için, "Her zaman ilk aşkım olacak," diyor. "Fillere gerçekten saygı duyuyorum. Ama örümcekleri *seviyorum*. Onca insanın örümcekleri bu denli yanlış anlaması bende onları daha da fazla övme isteği uyandırıyor."*

Örümcekler yeryüzünde yaklaşık 400 milyon yıldır yaşıyor ve muhtemelen bütün bu süre boyunca da ipek ürettiler.[48] Örümcek ipeği bir

* Titreşim duyularını araştıran pek çok biliminsanının aynı zamanda müzisyen olması dikkat çekici. Alanın öncüsü Frej Ossiannilsson keman çalıyordu. Rex Cocroft gönlünü biyolojiye kaptırmadan önce piyano eğitimi görüyordu. Beth Mortimer'sa aynı zamanda korno ve piyano çalan bir şarkıcı. (Yazar, Mortimer'ın örümcekler için "öve öve bitirememek" anlamında kullandığı "sing their praises" ifadesine gönderme yapıyor. [*ç.n.*])

mühendislik harikasıdır. Hafif ve esnek olmasına karşın çelikten daha sağlam, Kevlar'dan daha dayanıklı olabilir.[49] Örümcekler ipekle yumurtalarını sarar, yuva yapar, havada asılı kalır ve gökyüzünde süzülürler (bu konuya tekrar döneceğiz). En bilinen kullanım alanıysa birçok örümcek türünün ördüğü yatay, küre ağdır.

Küre ağ, uçan böcekleri yakalayan ve hareketsiz hale getiren bir tuzaktır.[50] Aynı zamanda örümceğin duyu menzilini vücudunun ulaşamayacağı noktalara kadar genişleten bir gözetleme sistemidir. Örümceğin vücudu binlerce yarık duyu organıyla kaplıdır; bunlar kum akrebinin, avının sismik etkinliğini saptamak için kullandığı, titreşimleri hisseden yarıklara benzer. Örümceklerde bu yarıklar, eklemler etrafında da yoğunlaşarak lir organı denen kümeler oluşturur. Bütün örümcekler bu olağanüstü hassas organları kullanarak, üzerinde durdukları herhangi bir şeyin içinden geçen titreşimleri hissedebilirler. Önceki bölümde gördüğümüz kaplan gezgin örümceği için o yüzey, yerdir. Altın ipek küre örücü örümcek gibi örümcekler içinse ağın kendisi. Bu örümcekler, içinden geçen titreşimleri hissedecekleri yüzeyleri kendileri inşa eder. O nedenle küre ağ yalnızca toprak, kum ya da bitki sapları gibi bir substrat değildir. Örümcek tarafından yapılır ve onun bir parçası haline gelir. Vücudundaki yarıklar kadar ağın kendisi de duyu sisteminin bir parçasıdır.

Mortimer'ın örümcek odasındaki altın ipek küre örücü örümcekler gibi küre ağ ören örümceklerin çoğu ağın ortasında oturur ve bacaklarını, titreşimleri ileten ışınsal ipliklerin üzerine koyar. Örümcek bu konumdayken, esen rüzgârın ya da dökülen yaprakların yarattığı titreşimleri, ağda debelenen avın titreşimlerinden ayırt edebilir.[51] Muhtemelen bacaklarından her birine çarpan titreşimlerin kuvvetini karşılaştırarak avın nerede debelendiğini anlayabilir.[52] Tutsakların büyüklüğünü tartıp daha iri olanlara daha dikkatli yaklaşır ya da uzak durur.[53] Av hareket etmeyi bırakırsa örümcek ipliği hızla çekip geri dönen titreşim yankılarını "dinleyerek" avını bulabilir.[54] İş avı yakalamaya geldiğinde, titreşimler diğer uyaranlara ağır basar. Örneğin örümcek, tepesinde vızıldayan lezzetli bir sineği başından savar. Sineği ancak ağı sarstığı zaman yiyecek olarak algılar.

Küre ağ ören örümceklerin titreşimlere bağımlılığı o denli mutlaktır ki birçok hayvan ayak seslerini kamufle ederek bu özelliği kendi lehine

çevirir. Küçük bir hırsız olan çiğ damlası örümceği *Argyrodes*, altın ipek küre örücü örümcek gibi daha büyük örümceklerin ağını kaçak kullanarak avlarını çalar.[55] Yakınlarda bir yerde saklanan *Argyrodes*, altın ipek küre örücü örümceğinin ördüğü ağın merkezine ve ışınsal ipliklere kendi ürettiği ipeği bağlayarak kendi duyu sistemini büyük örümceğinkiyle birleştirir. Böylece altın ipek küre örücü örümcek ne zaman bir şey yakalayıp depolamak için ipeğiyle sarmaya başlasa *Argyrodes* bilir. Hemen ağa koşar ve genellikle evsahibinin fark etmemesi için böceği ana ağdan ayırdıktan sonra yer. *Argyrodes* ağda yaratacağı titreşimlerle yerini belli etmemek için dikkatli davranır. Sadece altın ipek küre örücü örümcek hareket ediyorken koşar ama hareketsizse yavaş yavaş ilerler. Gerilimin aniden boşalmaması için kestiği iplikleri bırakmaz. Dümen çeviren hırsızı yakalamak hemen hemen imkânsızdır. Tek bir altın ipek küre örücü örümcek ağına 40 civarında *Argyrodes* yamanabilir.

Kimi hayvanların yağmacılıktan daha ölümcül niyetleri olabilir. Bazı suikastçı böcekler öylesine çaktırmadan yürür ki dosdoğru örümceğe gidip onu kendi ağının üstünde öldürebilir.[56] Diğer örümcekleri yiyen bir sıçrayan örümcek olan *Portia*, ince bir dal çarpmış hissini vermek için ağı kuvvetli biçimde tıngırdatır ve bu yanıltıcı titreşimlerle kafasını karıştırdığı avına saldırır.[57] *Portia* da suikastçı böcekler de ağa yakalanmış avın titreşimlerini taklit ederek örümcekleri çekmek için ağ ipliklerini çekip koparır. Bu yırtıcıların hepsi görsel olarak dikkat çekicidir ama yarattıkları titreşimler bir böceğin, ince bir dalın veya bir esintinin titreşimlerine benzediği sürece, ağ sahibi örümcek aradaki farkı anlayamaz. Örümcek, Friedrich Barth'ın "titreşimlerle dolu, küçük, örülü bir dünya" olarak tanımladığı ortamda yaşar.[58]

Küre ağ ören örümcek kendi titreşim ortamını yaratmanın yanı sıra, ağını bir çalgıyı akort edermişçesine ayarlayabilir. Bu çalgının akort aralığı muazzamdır. Gaz tabancalarıyla her bir ipek lifine atkılar fırlatan ve iplikleri yüksek hızlı kamera ve lazerler kullanarak analiz eden Mortimer, bazı ipeklerin, titreşimleri, bilinen bütün malzemelerden daha geniş bir hız aralığında iletebildiği sonucuna vardı.[59] Bir örümcek, ipeğin sertliğini, ipliklerdeki gerilimi ve ağın genel biçimini değiştirerek teorik olarak bu titreşimlerin hızını ve şiddetini değiştirebilir. Bunu her yeni ağ ördüğünde, vücudundan çıkan ipeği farklı hızlarda

çekerek, farklı kalınlıkta lifler üreterek ya da yeni ipliklerin gerilimini artırarak yapabilir.[60] Zaten örmüş olduğu ağları, iplik ekleyip çıkararak ya da belli ipliklere asılarak ayarlayabilir. İpeğin nemin etkisiyle doğal büzülme eğilimine güvenen örümcek, sıkıştırılmış iplikleri açıp gerektiği kadar uzatabilir. Bunları ne zaman yapacaklarına nasıl karar verdiklerini bilmiyoruz ama kendi duyularının ince ayarını yapma ve kendi Umwelt'lerini gereksinimlerine göre tanımlama seçeneğine sahip oldukları kesin.

Zoolog Takeshi Watanabe, *Octonoba sybotides* türü örümceğin, açken ağ yapısını değiştirdiğini keşfetti.[61] Örümcek ışınsal ipliklerin gerilimini artıran sarmal süslemeler ekleyerek ağın, küçük bir avın yaratacağı nispeten zayıf titreşimleri daha iyi iletebilmesini sağlar. Açlıktan karnınız zil çalıyorsa her lokma önemlidir. Örümcek, küçük lokmaları yakalayabilmek için ağının yapısını değiştirerek duyularının algı aralığını genişletir.

Ama asıl önemlisi Watanabe, aç bir örümceğin ördüğü gergin ağın üzerine koyduğu *tok* bir örümceğin de küçük sinekleri avladığını keşfetti. Örümcek, hangi ava saldıracağına karar verme işini *ağına* devretmiştir. Yapacağı seçim sadece nöronlarına, hormonlarına ya da vücudunun içindeki başka bir şeye değil, vücudunun dışında bulunan ve kendisinin yaratıp üzerinde değişiklikler yapabildiği bir şeye de bağlıdır. Lir organları daha titreşimleri saptamadan, ağ hangi titreşimlerin bacağa ulaşacağını belirler. Örümcek, farkına vardığı şeyi yer ve farkındalığının sınırlarını –Umwelt'inin boyutlarını– farklı türde ağlar örerek belirler.* O halde ağ, örümceğin sadece duyularının değil, aynı zamanda *bilişinin* bir uzantısıdır.[63] İpeği akort ederek âdeta kendi zihnini akort eder.

Örümcek, bedenini de akort edebilir. Biyofizikçi Natasha Mhatre, bednam karadul örümceğinin, duruşunu değiştirerek, eklemleri üzerindeki lir organlarını farklı titreşim frekanslarına göre ayarlayabildiğini gösterdi.[64] Karadul örümceği, karmakarışık yatay bir ağ örer ve normalde bacaklarını uzatıp bu ağdan baş aşağı sallanır. Ama acıkınca bacaklarını kendine doğru çekip "sinme" duruşuna geçer ve

* Ayrıca küre ağ ören örümcekler, dikkatlerini ağ üzerinde yiyecek gelme ihtimalinin en fazla olduğu kısımlara odaklayarak, avın tekrar tekrar yakalandığı yerlere ulaşan ışınsal iplikleri çeker.[62]

böylece eklemlerini daha yüksek frekansları hissedebilecek şekilde yeniden ayarlar. Bu duruş, karadul örümceğinin Umwelt'ini, tıpkı *Octonoba sybotides*'in gergin ağında olduğu gibi, daha küçük bir avın hareketlerini algılamasına imkân verecek şekilde genişletiyor olabilir. Ayrıca rüzgârın düşük frekanslı titreşimlerini görmezden gelmesini sağlıyor olabilir. Daha iyi görmek için gözlerimizi kısmamız gibi, örümcek de âdeta dikkatini odaklamak için bacaklarını kendine doğru çeker. Gerçi bu, durumu bire bir yansıtan bir benzetme değil çünkü gözleri kısmak, alanın belli kısımlarına odaklanmamızı sağlar. Oysa karadulun duruşu *enformasyon alanının* farklı kısımlarına odaklanır. Bu âdeta insanın gördüğü kırmızıları ön plana çıkarmak için çömelmesi ya da diğer sesler arasında tiz sesleri seçmek için dört ayak üstüne çökmesi gibi bir şeydir.

Karadulun sinmesi bana kum akrebinin avlanma duruşunu, altın köstebeğin başını gömmesini ve Caitlin O'Connell'a fillerin sismik duyusu hakkında ipucu veren, öne eğilip ayak ucunu yere bastırma duruşunu hatırlatıyor. Altlarında hareket eden titreşimleri çözümleyen hayvanlar, göründüğü kadarıyla üzerinde durdukları ortamla özel yollardan etkileşime girebiliyor. Bizim içinse yere oturmak yeterli.

Bir köpek yavrusuyla yaşamaya başladığımdan beri, yerde eskisine göre çok daha fazla zaman geçiriyorum. O konumdayken, daha önce dikkatimi çekmeyen yüzey titreşimlerini, evlerine girip çıkan komşuların ayak seslerini, çöp kamyonlarının gümbürtüsünü hissedebiliyorum. Kendimi aşağı doğru çekebildiğim bu dünya, Typo'nun daimi ikametgâhı. Bir korgi olarak o, titreşen zemine genellikle benden bir buçuk metre daha yakın. Ne hissettiğini merak ediyorum. Ne duyduğunu da merak ediyorum. Typo dinlenirken bazen ansızın başını kaldırır; Yoda'nınkine benzeyen kulakları benim duyamadığım bir şey duymuştur. Onun bu hali bana neler kaçırdığımı hatırlatır: Sadece altımızdaki zeminde ilerleyen yüzey dalgalarını değil, aynı zamanda etrafımızı saran havada hareket eden basınç dalgalarını, yani sesleri.

8.

Kulak Kesilmek

Ses

Roger Payne eskiden karanlıktan korkardı. Lisedeyken bu fobisini yenmek için geceleri evinin yakınındaki bir doğa koruma alanında uzun yürüyüşlere çıkıyordu. Tek başına yaptığı bu yürüyüşlerde çoğu zaman, civardaki bir binada yaşayan bir baykuşu duyardı (bazen de görürdü). Karanlık korkusunu yendikçe baykuşlara olan ilgisi arttı. 1956'da üniversite öğrencisiyken kuşları araştırma şansını yakalar yakalamaz fırsatın üstüne atladı.

Baykuşların gözleri büyüktür ama öyle zifiri karanlıkta avlanabilirler ki avlarını kendileri bile göremezler. Payne, kulaklarını kullandıklarından şüpheleniyordu. Öyle olup olmadığını anlamak için büyük bir garajın pencerelerini siyah plastik örtülerle kapladı ve kuru yaprakları zemine kalın bir tabaka halinde yaydı.[1] Köşedeki tüneğe, adını *Winnie-the-Pooh*'daki Wol karakterinden alan, insan eliyle büyütülmüş bir peçeli baykuş koydu. Sonra da karanlıkta otururken garaja bir fare saldı. "Hiçbir şey göremiyordum ama fare hareket etmeye başlayınca hışırtıyı duyabildim," diye anlatıyor Payne. Wol da duyabiliyordu. Deneyin ilk üç gecesi kuş hiçbir şey yapmadı. Ama dördüncü gece Payne bir darbe sesi duydu. Işığı yakınca, farenin Wol'un pençeleri arasında olduğunu gördü.

Sonraki dört yıl boyunca Payne, Wol ve başka peçeli baykuşlarla yaptığı deneylerde, avlarını ses yoluyla bulma konusunda baykuşların ne kadar usta olduklarını doğruladı.[2] Fareler tehlikeden haberdar görünüyor, Payne onları yapraklarla kaplı odaya soktuğunda usul usul gizleniyorlardı. Hışırdamaya başladıkları anda işleri bitiyordu. Olanları

kızılötesi dürbünle izleyen Payne, baykuşların ilk hışırtıya öne doğru iyice eğilerek tepki verdiklerini gördü. Baykuş ikinci hışırtıda kemirgene doğru kafa üstü dalışa geçiyor ve son anda, gövdesini yaklaşık 180 derece döndürüp tepetaklak oluyordu. Hamlelerinde o kadar isabetliydiler ki farenin tepesine binmekle kalmayıp hayvana uzun ekseni boyunca saldırıyorlardı. Payne yaprakların arasında fare büyüklüğünde bir kâğıt destesi sürüklerse baykuşlar ona da saldırıyordu. Farenin kuyruğuna tek bir yaprak bağlayıp köpük döşemenin üzerinde kaçmasına izin verdiğinde kuşlar yaprağa saldırıyordu. Bu testler, kuşların kullandığı duyunun koku ya da görme duyusu veya başka herhangi bir duyu olamayacağını doğruladı. Saldırıya geçtiklerinde kulaklarını kullandıklarına şüphe yoktu. Payne o kulaklardan birine pamuk tıkadığında, daha önce hiç hata yapmayan kuşlar, kemirgenleri 30 santimetre kadar ıskalamıştı. "Çok heyecan vericiydi," diyor Payne. "Deliller açıktı."

Bir fare hışırdarsa, bir köpek havlarsa ya da ormanda bir ağaç devrilirse dışa doğru yayılan basınç dalgaları oluşur.[3] Bu dalgalar ilerlerken, yollarına çıkan hava molekülleri tekrar tekrar bir araya toplanıp yayılır. Dalganın ilerlediği yönde gerçekleşen bu hareketlere ses deriz. Moleküllerin bir saniye içinde kaç kez sıkışıp dağıldığı, sesin frekansını yani perdesini tayin eder ve hertz (Hz) birimiyle ölçülür. Moleküllerin ne kadar hareket ettiğiyse sesin genliğini (amplitüd), yani şiddetini belirler ve desibel (dB) birimiyle ölçülür. İşitme, bu hareketleri saptayan duyudur.

Kulağınız üç bölümden oluşur: dış, orta ve iç kulak. Dış kulak, gelen ses dalgalarını karşılar ve kulak kepçesiyle topladığı dalgaları kulak kanalına yönlendirir. Ses dalgaları, kanalın sonundaki ince, gergin zarı titreştirir. Bu titreşimler, geçen bölümde gördüğümüz, orta kulaktaki üç küçük kemik tarafından güçlendirildikten sonra iç kulağa, özellikle de sıvıyla dolu, uzun bir tüp olan kokleaya (salyangoz) iletilir. Buradaki harekete duyarlı tüylü hücreler titreşimleri saptar ve beyne sinyaller gönderir. Sonuç olarak bir ses duyarız.*

Peçeli baykuşun kulağı da aynı temel yapıya sahiptir: Dış kulak toplar, orta kulak güçlendirir ve iletir, iç kulak saptar.[4] Fakat bizim dış

* Bu tüylü hücreler, balıkların yanal çizgilerindeki hücrelere benzer çünkü kulak ve yanal çizgi muhtemelen aynı duyu sisteminden evrilmiştir.

kulağımız bir çift kulak kepçesinden oluşur, baykuştaysa aslında yüzün tamamı dış kulaktır.* Baykuşa tipik yüz ifadesini veren bariz yüz diskindeki tüyler kalın, sert ve sıktır. Bunlar, gelen sesleri toplayıp kulak deliklerine yönlendiren bir çanak anten gibi işlev görür. Kulak delikleriyse baykuşun gözlerinin arkasında, tüylerin arasında bulunan çok büyük açıklıklardır. Bu delikler bazı türlerde o kadar geniştir ki üstünü örten tüyleri aralayıp da kulakların içine bakarsanız baykuşun gözyuvarlarının arkasını görebilirsiniz. Bu özelliklere ek olarak, cüssesine göre bir kuş için beklenenden çok daha büyük bir kulak zarı ve kokleaya sahip olması, peçeli baykuşun istisnai işitme duyarlılığına katkıda bulunur.

Baykuş yalnızca sesleri saptamakta değil, nereden geldiklerini anlamakta da ustadır.† Görme duyusuyla ilgili bölümden hatırlarsanız kolunuzu uzatıp başparmağınızı yukarı doğru kaldırdığınızda tırnağınız kabaca bir derecelik görüş açısını temsil eder. Masakazu Konishi ve Eric Knudsen, peçeli baykuşların, bir ses kaynağını taş çatlasın 2 derece sapmayla lokalize edebildiğini gösterdiler.[6] Bu, karasal hayvanların çoğuna göre daha iyi bir sonuçtur. Sözgelimi, kulakları kabaca peçeli baykuşunkiler kadar hassas olan kediler, sesleri ancak 3-5 derece sapmayla lokalize edebilir.

İnsanlarda işitme, yatay düzlemde baykuştaki kadar iyidir ama lokalizasyon doğruluğunun 3-6 dereceye indiği düşey düzlemde belirgin

---

* Diğer bazı farklılıklar şunlardır: Baykuşun kokleası muz gibi kıvrık, bizimki salyangoz kabuğu gibi sarmal şeklindedir. Ayrıca memelilerden farklı olarak peçeli baykuşlar ve diğer kuşların kulakları yaşlanmaz. Onlarda tüylü hücreler rejenere olur ve yaş ilerledikçe işitme duyusunun duyarlılığı pek azalmaz.[5] Şaşırtıcı ama kulaklı orman baykuşu, kır baykuşu ve akrabalarının dikkat çekici kulak tutamları süsten ibarettir, aslında kulağın bir parçası olmayıp işitmede rol oynamazlar.

† Ancak bir peçeli baykuş bile her şeyi duyamaz. İnsanlar ve diğer hayvanlar gibi baykuş da ancak belli bir frekans aralığındaki sesleri duyabilir. Bu aralığı, hayvanın kokleasındaki uzun taban zarı [*baziler membran*] üzerinde dizili tüy hücrelerini tayin eder. Bu zarın tabanı düşük, ucuysa yüksek frekanslarda titreşir. Baykuşun beyni, zarın hangi bölümlerinin titreştiğine ve hangi tüylü hücrelerin uyarıldığına göre işitme aralığının alt ve üst sınırlarını belirler. İnsanlar ortalama 20 Hz ile 20 kHz aralığını işitir; baykuşlardaysa işitme aralığı 200 Hz-12 kHz olacak şekilde biraz daha dardır. Özellikle 4-8 kHz arasındaki seslere duyarlıdırlar ve ölü yapraklar arasında seğirten farelerin çıkardığı ses frekanslarının bu aralıkta yer alması tesadüf değildir.

olarak daha kötüdür. Bunun sebebi, kulaklarımız aynı seviyede oldukları için seslerin ister aşağıdan ister yukarıdan gelsin her ikisine de yaklaşık olarak aynı anda ulaşmasıdır.* Oysa bir baykuşun kulakları benzersiz biçimde asimetriktir; sol kulağı sağdakine göre daha yukaridadır.[7] Bir baykuşun yüzünü saat olarak düşünürseniz sol kulak deliği saat iki, sağ kulak deliğiyse saat sekiz hizasındadır. Yukarıdan *ya da* soldan gelen bir ses, aşağıda kalan sağ kulağa kıyasla yukarıda kalan sol kulağa biraz daha erken ve gür ulaşır. Ses aşağıdan ya da sağdan geliyorsa tam tersi olur. Baykuşun beyni zamanlama ve sesin gürlüğü arasındaki bu farklılıkları kullanarak hem yatay hem de düşey düzlemde ses kaynağının yerini belirler.[8] Yürüyüşe çıktığımda yakınlardan gelen bir hışırtı duyarsam sesin kabaca nereden geldiğini anlayabilir, gözlerimle kaynağın kesin yerini saptayabilmek için başımı o yöne çeviririm. Ama üzerimdeki bir dala tünemiş olan baykuş, sadece kulaklarını kullanarak sesin *tam olarak* nereden geldiğini anlayabilir. Bir büyük gri baykuş, üzeri karla kaplı tüneldeki bir lemmingi oradan çekip alabilir ya da sırf yeraltından gelen çiğneme veya ayak seslerini dinleyerek bile bir kemirgenin bulunduğu oyuğa tam da doğru noktadan dalış yapabilir. Bu çarpıcı özellikler, işitme duyusunun neden bu kadar yararlı olabileceğine işaret eder.

Geleneksel beş duyu içinde işitmeyle en yakından ilişkili duyu, dokunmadır. Dokunma katı ve elle tutulur yüzeylerle, işitmeyse havada yayılan eterik seslerle ilgili olduğundan, aralarındaki bağlantı mantığa aykırı gelebilir. Ancak her ikisi de büküldükleri, bastırıldıkları ya da başka yöne döndükleri zaman elektriksel sinyaller gönderen reseptörler aracılığıyla dış dünyadaki hareketleri saptayan mekanik duyulardır. Dokunmada bu hareketler parmak uçları (ya da bıyıklar, gaga ucu ve Eimer organları) bir yüzeye bastırıldığı ya da sürtündüğü zaman ortaya

* Seslerin yönünü bilinçli düşünerek belirlemediğimiz için bu işin aslında ne denli zor olabileceğini fark etmeyiz. Uzam algısı gözün doğasında vardır çünkü dış dünyanın farklı yerlerinden gelen ışık retinanın farklı bölgelerine düşer. Oysaki kulaklar, ses frekansı ya da şiddeti gibi içkin uzamsal bileşeni olmayan nitelikleri yakalar. Bir hayvanın bu bilgiyi alıp bir haritaya dönüştürebilmesi için beyninin gerçekten sıkı çalışması gerekir.

çıkar. İşitmedeyse hareketler, ses dalgaları kulağa ulaşıp içindeki tüylü hücrelerin yönünü değiştirdiğinde meydana gelir.

Ancak dokunmanın aksine işitme uzun mesafelerde çalışabilir. Görmenin aksine işitme karanlıkta ve katı, opak engellerden geçerek işlev görür. Önceki bölümde gördüğümüz titreşim duyusunun tersine, işitme bir yüzeye ihtiyaç duymaz ve hava veya su gibi her şeyi kucaklayan ortamlarda çalışır. Moleküllerin yavaş difüzyonuyla sınırlı koku duyusunun tersine işitme, çok daha hızlı olan ses hızında çalışır. Bazı duyularda bu niteliklerden birkaçı ama işitme duyusunda hepsi vardır; bazı hayvanlar bu nedenle işitme duyusuna bu denli bel bağlar. William Stebbins, bunu kısa ve öz biçimde çok güzel açıklar: "Diğer uyarım (stimülasyon) biçimlerinden çok farklı olarak, [ses] güncel olaylar hakkında görünmeyen bir mesafeden bilgi verebilir."[9]

Bir baykuşu bir çıngıraklıyılanla karşılaştıralım. İkisi de gececildir. İkisi de kemirgenleri avlar. Çıngıraklıyılan çok sık yeme ihtiyacı duymaz ve pusu kurarak avlanır. Uzun süren bir gözetimde doğru noktayı bulmak için koku alma duyusunu kullanabilir ve kurbanı, kızılötesi duyusunun kısa menziline girip koşmaya başlana dek bekleyebilir. Baykuşun böyle bir lüksü yoktur. Yüksek metabolizmasını sürdürebilmesi için daha düzenli avlanması gerekir; ormanda geniş bir alanı taramak ve hızlı hareket eden ama görünmeyen kemirgenlerin çıkardığı hışırtıların nereden geldiğini isabetli saptamak zorundadır. Uzun menzilli, hızlı ve hassas çözünürlüğe sahip işitme, doğal olarak birincil duyusudur.

Ancak sesten faydalanarak avlanmanın önemli bir dezavantajı vardır: Parazit sesler. Görme duyusunun yönlendirdiği kartal gibi bir yırtıcı hareket ederken ışık yaymaz ama bir baykuş kanat çırparken ister istemez gürültü yapar. Baykuşun kulaklarına yakın olan bu gürültüler avının çıkardığı, uzaktan gelen, zayıf sesleri boğabilir. Neyse ki baykuşun yumuşacık vücut tüyleri ve kanat kenarlarının tırtıklı olması uçuşunu hissedilemeyecek kadar sessiz kılar.[10] Yaptığı gürültü, kulaklarının en duyarlı olduğu aralığın ve küçük kemirgenlerin işitebileceği sınırın çoğunlukla altında kalır.[11] Baykuş bir fareyi gayet iyi duyabilir ama fare baykuşun gelişini zar zor işitir.

Fakat kanguru sıçanları baykuşu duyabilir. Bu küçük, zıplayan kemirgenlerin orta kulakları cüsselerine göre devasa boyutlarda ve

beyinlerinden daha büyüktür.[12] Orta kulak özellikle baykuş kanatlarının çıkardığı düşük frekanslı sesleri güçlendirdiği için kanguru sıçanı, diğer kemirgenlerin tersine yaklaşan tehlikeyi duyabilir. O nedenle peçeli baykuşların bu hayvanları yakalaması çok zordur.[13] Hatta kanguru sıçanları, çıngıraklıyılanların saldırı anında çıkardığı sesleri duyup güçlü bir sıçrayışla havada dönerek yılanın suratına tekme atacak zamanı bile bulabilir.[14] (Isıyla ilgili bölümde karşılaştığımız yılan uzmanı Rulon Clark onları "av olarak bilhassa çekilmez bir hayvan" olarak tarif ediyor.)

Bu canlıların hepsi birbirlerine sesle bağlıdır. Duyabildikleri frekanslar, bu frekanslara ne kadar hassas oldukları ve ses kaynağının yerini saptayabilme becerileri onlar için hayat memat meselesidir. Her türün kendine has güçlü ve zayıf yönleri vardır. Bir baykuş, koşuşan farelerin ürettiği frekanslara azami düzeyde duyarlıdır ve bu seslerin yerini neredeyse benzersiz bir isabetle tespit edebilir ama insan kulağının saptayabildiği en tiz ve en pes notaları duyamaz. Fareler bir baykuşun hafif kanat seslerini duyamaz ama farelerin tiz alarm çağrılarını da baykuş duyamaz. Diğer duyular gibi işitme de hayvanın gereksinimlerine göre ayarlanmıştır. Hatta bazı hayvanlar işitmese de olur.

Bizim yuvarlak kulaklarımız, çöl tilkisinin sivri, üçgen kulaklarından, fillerin devasa kulak kepçelerinden ya da yunusların basit deliklerinden çok farklı görünüyor olsa da bu farklılıklar yüzeyseldir. Memelilerin çoğu çok iyi duyar ve kulakları çoğunlukla birbirine benzer. Her şeyden önce bu hayvanların kulakları vardır. Kulaklar her zaman iki tanedir. Hayvanın başındadır. Bu mutlakların hiçbiri böcekler için mutlak doğru değildir. Onlarda da kulaklar evrilmiştir ama bu kulaklar, bize hayvanların niçin duyduğuna dair üç önemli ders veren, baş döndürücü bir çeşitlilik sergiler.[15]

İlk ders şudur: İşitme yararlıdır ama bu fayda, dokunma ve nosisepsiyonda olduğunun tersine evrensel değildir. Ne de olsa ilk böcekler sağırdı.[16] İşitebilmeleri için kulakların evrilmesi gerekiyordu ve bu, böceklerin 480 milyon yıllık tarihinde, birbirinden bağımsız olarak en az 19 kez ve böcek vücudunun akla gelebilecek her yerinde gerçekleşti.[17] Cırcırböcekleri ve çayır çekirgelerinin kulakları dizlerinde, göçmen çekirgeler ve ağustosböceklerininkiler karınlarında, atmaca güvelerininkilerse ağızlarındadır.[18] Sivrisinekler antenleriyle işitir.[19] Kral kelebeğinin tırtılı,

göğüs bölgesindeki bir çift kılla işitir.[20] Keseli çekirgelerin karınlarından aşağı inen altı çift kulağı, peygamberdevelerininse göğsün ortasında kiklop gözü gibi birleşmiş tek kulağı vardır.[21]* Böcek kulaklarındaki bu çeşitliliğin sebebi, çoğunun, böceğin her yerinde bulunan harekete duyarlı kordotonal organlardan gelişmiş olmasıdır.[23] Sert dış kütikülanın hemen altındaki duyu hücrelerinden oluşan bu organlar titreşimlere ve gerilme hareketlerine yanıt verir. Bunlar böceğe, vücudun farklı bölümlerinin – açılıp kapanan kanatlar, hareket eden bacaklar, genişleyen bağırsaklar– konumu hakkında bilgi verir. Fakat kordotonal organların hava kaynaklı çok yüksek seslere de tepki verebilmesi, kulağa dönüşmelerine neredeyse zemin hazırlar. Yalnızca daha duyarlı olmaları gerekir ve üzerlerini örten kütikülanın incelerek bir kulak zarına dönüşmesiyle bu sorun da kolayca çözülür.† Bu, vücudun hemen her yerinde olabileceği için böceklerin en olmadık yerlerinde kulak ortaya çıkabilir. Âdeta bütün vücut yüzeyi işitmeye hazırlıklıdır.

Ancak birçok böcek, evrimsel açıdan kolayca ulaşılabilecek bu özellikten faydalanmamıştır. Bildiğimiz kadarıyla mayıs sinekleri ve yusufçuklarda kulak bulunmaz. Kınkanatlıların da çoğunda kulak yoktur. Hatta görünüşe göre çoğu sağır olan böcekler sayıca diğer bütün hayvan türlerinden fazla olduğuna göre bundan, *hayvanların çoğunun belki de sağır olduğu* gibi bir sonuç çıkar. Ses, bilhassa işitebilenlere her yerde var olan bir şeymiş gibi geldiğinden, bu çıkarım bize garip görünebilir. Buna rağmen milyonlarca sağır insan işitme duyusu olmadan da gayet iyi idare eder ve birçok hayvan duymamayı dert etmez. Memelilere ve diğer omurgalılara baktığınızda, işitmenin paha biçilmez bir duyu olduğunu düşünebilirsiniz. Ama böceklere baktığınızda, kesinlikle keyfe keder olduğunu anlarsınız.

* 1968'de zoolog David Pye'ın böcek kulaklarıyla ilgili beş dizelik hoş bir şiiri, dünyanın birinci sınıf bilim dergilerinden *Nature*'da yayımlanmıştı. 2004'e dek biliminsanları bu kulaklar hakkında o kadar çok şey öğrendiler ki Pye 12 dize daha eklediği bir devam şiiri yayımlamak zorunda kaldı: "Sonraki yıllarda anladık ki / Biçim biçim başka kulaklar pek çok. / Öğrendiklerimiz bize gösteriyor ki / Gerçekte norm diye bir şey yok."[22]

† Bütün böceklerde kulak zarı bulunmaz. Sivrisineklerin antenleri ve kral kelebeği tırtıllarının kılları daha çok, örümceklerin ve cırcırböceklerinin Altıncı Bölüm'de gördüğümüz, hava akımına duyarlı kılları gibi davranır.

Görme duyusunda olduğu gibi, hayvanların nasıl işittiğini düşünürken, önce kulaklarını nasıl kullandığını anlamalıyız. İşitme, hızlı, hassas, uzun menzilli ve 24 saatlik bilgi akışı sağlayarak, hayvanların özellikle hem çabuk hareket eden avı hem de hızla yaklaşmakta olan tehlikeleri algılamasına olanak tanıdığı için yararlıdır. Bu nedenle pek çok böceğin kulakları, görünüşe göre yırtıcıları dinleyecek şekilde gelişmiştir.[24] Çarpıcı bir görünüme sahip mavi morfo gibi birçok kelebeğin kulakları kanatlarındadır.[25] Bu türler sessiz oldukları için birbirlerini dinlemedikleri kesindir. Jayne Yack, kanatlardaki kulakların, yırtıcı kuşların çıkardığı frekanslara hassas olduğunu gösterdi.[26] Kelebekler, birkaç metre öteden kuşların kanat vuruşlarını, bölgesel çağrıları ve muhtemelen ilgili diğer sesleri, örneğin çimenlerin arasında dolaşırken tüylerin çıkardığı hışırtıları ya da daldan dala zıplarken çıkan ayak seslerini duyabilirler. Kulaklarını büyük olasılıkla kanguru sıçanına benzer şekilde kullanırlar.*

Yırtıcıları saptamada iyi bir yol olmasını sağlayan nitelikler işitme duyusunu aynı zamanda iletişim amaçlı kullanılmaya yatkın kılar. Hayvanlar ses çıkararak ve sesleri dinleyerek, yüzey titreşimlerinin erişemeyeceği uzak mesafelerde, görsel işaretleri örten karanlık ve karışık alanlarda, feromonların başarabileceğinden çok daha süratli sinyal alışverişi yapabilirler. Cırcırböcekleri ve çayır çekirgeleri belki de bu yüzden milyonlarca yıl önce ötmeye başladılar.

Gürültücü olanlar erkeklerdir. Kanatlarından birinde bir çıkıntı, diğerindeyse taraktakine benzer bir sıra diş bulunur. Bunları birbirine sürterek dişilerin ön bacaklarındaki kulak zarıyla duyabildiği bir *cır cır* sesi çıkarırlar. Böcek fosillerinin kanatlarında gördüğümüz aynı çıkıntı ve taraksı dişler, bu seslerin en az 165 milyon yıldan beri ve muhtemelen daha da uzun süredir çınladığını düşündürür.[27] Fakat yaklaşık 40 milyon yıl önce, bir başka böcek grubu, asalak tırtıl sinekleri bu seslere kulak

* Kulağın yırtıcıları saptama yeteneği, bazı böcek gruplarının niye kulak geliştirme zahmetine girmediğini açıklayabilir. Kulaksız mayıs sinekleri belki de çok kalabalık gruplar halinde havalandıkları için kendilerini yırtıcılara karşı güvende tutacak bir erken uyarı sistemine ihtiyaç duymazlar. Kulakları olmayan yusufçuklar da yaklaşan tehlikeyi fark etmek için sahip oldukları mükemmel görme yeteneğine ve yakın mesafeli saldırıları bile savuşturmalarını sağlayan havacılık zekâlarına güveniyor olabilir.

kabartmaya başladı. Bu sinekler görme ve koku alma duyularını kullanarak kurbanlarının izini sürer. Ancak Kuzey ve Güney Amerika'da bulunan, bir santimetreden biraz büyük, sarı bir tür olan *Ormia ochracea* sesi kullanır. O da dişi cırcırböcekleri gibi erkeğin ötüşünü dinler. Kulağa hoş gelen o *cır cır* seslerine yönelen sinek, şarkıcının üzerine ya da yakınına konup larvalarını bırakır. Bu larvalar böceğin vücuduna gömülerek onu içten içe yavaş yavaş yer.

Ormia'nın kulakları bariz değildir. Ama Daniel Robert böcek kulaklarına o kadar aşinaydı ki bu sineği ilk kez 1990'larda mikroskopla incelerken, boynunun altındaki iki ince, oval zardan oluşan bir çift kulak zarını hemen fark etmişti.[28] ("Belki de fazla takıntılıyım," diyor Robert.) Çoğu sineğin kulakları genellikle antenleri üzerinde bulunduğu ve tüylü olduğu halde bu sineğinkiler farklıdır. Daha çok dişi bir cırcırböceğinin kulaklarına benzer ve erkeğin ötüş frekansına ayarlıdır. Dişi cırcırböceğinin işitsel Umwelt'ine giren *Ormia*, onu aynı amaçla, görünmeyen bir erkeği uzaktan tespit etmek için kullanır. Evin bir yerinde öten bir cırcırböceğiyle başınız derde girdiyse o lanet cırıltının kaynağını bulmanın ne kadar zor olduğunu bilirsiniz. Oysa *Ormia* bunu dert etmez. Öten bir cırcırböceğine insanlar, peçeli baykuşlar ve bu konuda sınanmış hemen her hayvandan çok daha isabetli olarak, sadece 1 derecelik sapmayla dönebilir.[29*]

---

* Peçeli baykuş bize hayvanların, sesin kulaklardan her birine ulaşma süresini karşılaştırarak nereden geldiğini anlayabildiklerini gösterdi. Fakat hayvanların boyutları küçüldükçe kulakları birbirine yaklaşır ve sesler her iki kulağa da hemen hemen aynı anda ulaşır. *Ormia*'nın kulakları arasındaki mesafe yarım milimetreden az, yani *i* harfinin noktası kadardır. Bu denli minik mesafelerde bir cırcırböceğinin cırıltısı iki kulak zarına en fazla 1,5 mikrosaniye arayla çarpar; bu zaman aralığı o kadar dardır ki pratikte yokmuş gibi düşünülebilir. (Karşılaştırma yapmak gerekirse insan kulaklarının bir sesin nereden geldiğini saptayabilmesi için sesin iki kulağa en az 500 mikrosaniye arayla ulaşması gerekir.) Fakat Robert ve hocası Ron Hoy, *Ormia*'nın kulak zarlarının da bizimkiler gibi birbiriyle bağlantılı olduğunu gösterdiler.[30] Sineğin minik kafasının içinde kulak zarları elbise askısına benzer esnek bir kaldıraçla birbirine bağlanır. Ses kulak zarlarından birini titreştirince, kaldıraç bu titreşimleri karşı taraktaki zara yaklaşık 50 mikrosaniyelik kısa bir gecikmeyle iletir. Bu gecikme, iki kulak arasındaki zaman farkını önemli ölçüde artırır ve herhangi bir cırcırböceğini duyan *Ormia* ile şuradaki cırcırböceğini duyan *Ormia* arasındaki farkı yaratır.

Fevkalade keskin olmasına karşılık, *Ormia*'nın kulakları aslında çok basit bir davranışı kontrol eder: *Cırcırböceğini bul*. Jayne Yack'e göre, birçok böcek kulağı için geçerli bu durum, kulakların niye vücudun bu kadar farklı yerlerinde gelişmiş olduğunu da açıklayabilir. Yack, kulakların, hangi eylemler için evrilmişlerse genellikle o eylemleri kontrol eden nöronlara yakın bulunduklarını söylüyor. Dişi cırcırböcekleri, cırıldayan erkeklere doğru dönüp yürüdükleri için kulakları bacaklarındadır. Peygamberdeveleri ve güveler, yırtıcıların sesini duyduklarında havada dalış ve yuvarlanma manevraları yaparak kaçtıkları için kulakları kanatlarındadır. (Kulaklı bir güvenin yanında köpek düdüğü çalarsanız havada dönmeye ve sarmallar çizmeye başlar.)

Böceklerden öğrenebileceğimiz ikinci ders şudur: İşitme son derece basit olabilir. Cırcırböceğinin zihninde, dinlediği şeyin bir temsilinin oluştuğunu ve böceğin bunu ideal bir erkeğin cırıltısına ilişkin içsel bir şablonla karşılaştırdığını düşünebilirsiniz. Oysa bunların hiçbiri gerekli değildir. Barbara Webb, yaptığı zahmetli çalışmaların sonucunda dişi cırcırböceğinin, kulaklar ve bunlarla bağlantılı nöronlardan oluşan devre sayesinde, erkeğin sesini *kendiliğinden* tanıyıp ona doğru yöneldiğini gösterdi.[31] Dişinin eylemleri duyusal sisteminin yerleşik bir parçasıdır.* Müziğimize ve dilimize dayanak oluşturan işitme duyusunu, düşünce, duygusallık ve yaratıcılığın karmaşıklığından ayırmak zor olabilir. Öte yandan işitme, dizine çekiçle vurulan bir insanın refleks olarak bacağını kaldırma tepkisiyle de benzer olabilir.

Basit davranışlar bile önemli sonuçlar doğurabilir. *Ormia*'nın akustik üstün yeteneği son derece güçlüdür; hatta bir keresinde Hawaii'deki erkek cırcırböceklerinin üçte birini etkileyerek sayılarının ciddi anlamda azalmasına yol açmıştı. Buna yanıt olarak cırcırböceklerinin kanatlarındaki taraksı yapının eğrilmesine neden olan bir mutasyon ortaya çıktı ve cırıltılar kesildi. Cırcırböcekleri ölümden kaçmak için yekvücut olup sustu. Yirmi kuşak içinde olup biten bu olay, "düz kanatlı" cırcırböceklerini, evrimin doğada belgelenmiş en hızlı örneklerinden biri haline getirdi.[33] Yeni ortaya çıkan bu sessiz erkekleri sadece *Ormia* değil, dişiler

* Dahası Webb, tıpkı dişi cırcırböceği gibi davranan ve bir erkeğin cırıltısına ilişkin içsel bir kavramsallaştırması olmamasına rağmen, cırıldayan erkeği takip eden basit bir robot yapmıştır.[32]

de tespit edemez. Sessiz erkekler, yaklaşan dişilerle sinsice çiftleşebilme umuduyla hâlâ cırıldayabilen az sayıda erkeğin etrafında dolanıp durur ve kendileri de hâlâ *cırlayabiliyormuş* gibi kanatlarını birbirine sürtmeye devam ederler.

Böylece böcek kulaklarından öğreneceğimiz üçüncü derse geliyoruz: İşitme duyusu, hayvanlarda çağrıların evrimini, çağrılar da işitme duyusunun evrimini yönlendirebilir. Nasıl ki gözler doğanın renk paletini tayin ediyorsa kulaklar da doğanın seslerini tayin eder.

Genç bir üniversite mezunu olan Mike Ryan, 1978 yazında uzun bir uçak, tren ve tekne yolculuğunun ardından, Panama'da kurbağalar üzerine araştırma yapacağı Barro Colorado Adası'na gelmişti. Kendisinden yaşça büyük bir biyoloğun, kurbağa türlerini sırf seslerinden ayırt edebildiğine tanık olduğundan beridir gönlünü amfibilere kaptırmıştı. Bir insan, düzensiz bir kakofoni olarak algıladığı seslerde bu kadar çok şey duyabiliyorsa, diye düşünmüştü Ryan, kimbilir kurbağanın kendisi neler duyuyor? Erkeklerin çağrılarının dişileri cezbetme amaçlı olduğunu biliyordu ama dişiler bu seslerin hangi bölümlerini dinliyordu? Bir kurbağaya hangi sesler hoş geliyordu?

Başlangıçta Ryan'ın planı, Panama kırmızı gözlü ağaç kurbağasını, yani gelecekte öğrencisi olacak Karen Warkentin'ın yirmi yıl sonra odaklanacağı kurbağa türünü araştırmaktı.* Fakat bu hayvanlar ağaç tepesinden inmedikleri gibi, pek konuşkan da değillerdi. Ryan seslerini kaydetmeye çalışırken, ayağının dibinde bağıran çok daha gürültücü bir türün, túngara kurbağasının seslerini kaydediyordu.[34] "Seslerini kessinler diye ayağımla iteleyip duruyordum," diyor Ryan. "Sonra kendi kendime şöyle dedim: Tabii ya! Niye *onları* araştırmıyorum ki? Burada, ayağımın dibinde bu kurbağalardan tonlarcası var."

Gözünüzün önüne ortalama bir kurbağa getirin. Túngara kurbağası ona benzer. Yaklaşık 2,5 cm uzunluğundadır; yosun rengi derisi pütürlü ve nemlidir. Fakat görsel açıdan eksik olan ihtişamını akustik yeteneğiyle telafi eder. Günbatımından sonra erkekler kocaman ses keselerini

* Geçen bölümde karşılaştığımız ağaçpiresi meraklısı Rex Cocroft da Ryan'ın öğrencilerindendi.

şişirip içindeki havayı beyinlerine göre daha büyük olan gırtlaklarından dışarı iterler. Uzaklaştıkça pesleşen minik bir siren gibi, kısa bir sızlanışa benzer bir ses çıkarırlar. Sonrasında erkek bu sızlanışa, tavuk gıdaklamasına benzer bir ya da birkaç *staccato* süsleme ekleyebilir. Bu bileşik çağrılar, kurbağaya adını veren "tún-ga-ra" sesi gibi duyulur. Ryan'a göre bu ses, eski bir bilgisayar oyunundaki ses efektine benziyor.* Aynı ses dişi bir kurbağa için davet anlamı taşır. Erkeklerin sızlanma ve gıdaklamalarını kıyaslayan dişi, yumurtalarını döllemesi için en albenili erkeği *sesine göre* seçer. Kur yapan erkekler, seçilene dek bir akşamda 5 bin çağrı gönderebilir. Ryan öyle olduğunu biliyor çünkü Barro Colorado'da tek tek işaretlediği bin túngara kurbağasının serenatlarını ve hoppalıklarını peş peşe 186 gece boyunca günbatımından gündoğumuna dek kaydetmiş.[35] Kendisi bu röntgencilik maratonundan önemli bir gerçeği öğrenmiş: Gıdaklamaların *çok* seksi olduğunu.

Dişiler her zaman sızlanmalarını gıdaklamalarla süsleyen erkekleri tercih eder.[36] Gıdaklamalar o kadar makbuldür ki dişi bu sesleri çıkarmaya yanaşmayan erkeğe bazen sesleri duyana kadar tos vurur. Ryan erkeklerin çağrılarını kaydettikten sonra sızlanmaları ve gıdaklamaları farklı kombinasyonlar halinde parçaladı. Ses yalıtımlı bir odada bu remiksleri çiftler halinde, farklı hoparlörlerle dinlettiği dişilerin hangi seslere zıplaya zıplaya yaklaştığını inceledi. Sızlanmanın tek başına da çekici olduğunu ama gıdaklamaların sesi beş kat çekici hale getirdiğini fark etti. Gıdaklama ne kadar fazlaysa sesin seksapeli o kadar artıyordu. Pes gıdaklamalar tiz olanlardan daha seksiydi. Tercihler basitti ama nedenleri basit değildi.

Ryan, kurbağa iç kulağının, ortalama bir gıdaklama sesinin hâkim frekansının biraz altında kalan 2130 Hz'e özellikle duyarlı olduğunu keşfetti.[37†] Birkaç türün çağrılarının eşzamanlı duyulduğu gürültülü

---

* Ryan, túngara kurbağalarını çok iyi taklit ediyor ama kendi ses kaydını hoparlörle dinleterek bir dişiyi kandırmayı daha önce hiç denemediğini öğrenince hayal kırıklığına uğruyorum. "Bunu mutlaka yapmalıyım," diyor Ryan.

† Teknik olarak kurbağanın iç kulağında iki işitme organı bulunur. Bu organlardan biri olan amfibi papillasının en hassas olduğu frekans 700 Hz, yani sızlanma sesinin frekansıdır. Diğer işitme organı olan baziler papillaysa gıdaklamaların frekansına ayarlıdır.

bir gölette bile bir dişi kendi türünden erkekleri kolayca bulabilir, çünkü çağrılarını diğerlerininkilere kıyasla daha iyi duyabilir. Nispeten iri erkeklerin sesleri daha pes ve dişinin iç kulağının duyabildiği ideal frekansa daha yakın olduğu için bu erkeklerin sesleri daha yüksek ve net duyulur. Ayrıca iri erkekler daha çok yumurta dölleyebilir; o yüzden geçmiş kuşaklarda daha düşük frekansları tercih etmiş dişiler, daha fazla yavru vermelerini sağlayan erkeklerin cazibesine kapılmış olsa gerek. Bu erkeklerin dişiler tarafından giderek daha fazla tercih edilmesi sonucunda, türün kulakları erkeğin ses frekansına hassas hale gelmiş olmalı. Bu hikâye son derece akla yakın olmakla birlikte tamamen yanlıştır.

Ryan hikâyenin aslını, túngara kurbağasının en yakın akrabasını incelerken keşfetti.[38] Bu ikinci türde erkeklerin hepsi sızlanır ama sadece birkaçı gıdaklama sesi çıkarır. Buna rağmen hepsinin iç kulağı, túngara kurbağasının gıdaklama frekansına ayarlıdır. Akraba tür, hiç duymadığı halde bu gıdaklamaları çekici bulmaya eğilimlidir. Ryan bunu göstermek için Ekvador'a gidip túngaranın gıdaklamayan akrabalarından Colorado cüce kurbağası üzerinde çalıştı. Erkeğin sızlanışını kaydetti, üstüne túngaranın gıdaklamalarını ekledi ve elde ettiği melez çağrıyı dişilere dinletti. "Korkudan ödleri kopacak sanıyordum," diyor Ryan. Ama onun yerine dişiler, hiç tanımadıkları bu kimerik seslere doğru zıplaya zıplaya yaklaşmışlardı. Dişilerin daha önce hiç duymadığı gıdaklamalar, işitme duyularında öteden beri var olan tuhaf bir özellikten faydalandığı için karşı konulamaz nitelikteydi.

Bu keşif Ryan'ın kafasındaki hikâyeyi ters yüz etti.[39] Túngara kurbağasının işitmesi çağrıya uyum sağlamak için değişmemişti. Tam tersi olmuştu. Kurbağanın atasının kulakları zaten 2130 Hz'e ayarlıydı ve gıdaklamalar bu uyumdan faydalanacak şekilde evrilmişti. Kurbağanın atasında niye böyle bir değişim olduğunu hâlâ bilmiyoruz. Belki de bu, bir yırtıcının çıkardığı hışırtıların ya da kurbağanın yaşadığı çevrenin önemli bir parçasının ürettiği bir frekanstı. Sebep ne olursa olsun, dişinin estetik tercihi önce gelmiş, erkeğin çağrıları dişinin güzellik anlayışına uyum sağlayacak şekilde değişmişti. Ryan'ın "duyusal istifade" [*sensory exploitation*] olarak adlandırdığı bu fenomenin hayvanlar

âleminde yaygın olduğu gösterildi.[40]* Doğadaki sesleri gerçekten de doğadaki kulaklar tayin eder.

Erkek túngara kurbağaları, dişilerin dikkatini çekmenin kolay yolunu bulmuştur. Gıdaklama sesi çıkarmak pek az çaba gerektirir ama erkeklerin cazibesini beş kat artırır. "Daha çekici olmak için yaptığımız onca şeyi düşünsenize... üstelik onlarınki bedava," diyor Ryan. Olabildiğince sık ve tekrarlı gıdaklamaları gerektiği halde erkekler garip bir biçimde buna isteksizdir. Sızlanmaya eklenen gıdaklamaların sayısı bazen yediyi bulabilirse de erkeklerin çoğu sadece bir iki gıdaklama ekler. Birçoğuysa bunu yapmayı toptan reddeder. Erkeklerin bu suskunluğu kafa karıştırıcıydı, ta ki Ryan çağrıları dişilerden başka dinleyenler de olduğunu fark edene kadar.

Ryan, Barro Colorado'ya gelmeden bir yıl önce meslektaşı Merlin Tuttle, ağzında yarı yenmiş bir túngara kurbağasıyla bir yarasa yakalamıştı. Saçak dudaklı yarasa denen bu türün açgözlü bir kurbağa yiyicisi olduğu anlaşıldı. Tuttle ve Ryan, *Ormia*'nın cırcırböceklerinin cırıltılarına kulak vermesi gibi, bu yarasanın da avının kur çağrılarını gizlice dinleyerek iz sürdüğünü gösterdiler.[42] Dahası, tıpkı dişi túngara kurbağaları gibi yarasa da sızlanmaların sonuna gıdaklama ekleyen erkeklere yöneliyordu. Dişi çiftleşeceği eşin, yarasaysa yiyeceği yemeğin sesini duyar ama ikisi de dinledikleri seste aynı nitelikleri arar. Bu da erkek kurbağaları imrenilmeyecek bir seçim yapmaya zorlar. Gıdaklayarak hem dişilere hem de ölüme kur yaparlar. Bazen yalnızca sızlanmakta ısrar etmeleri hiç de şaşırtıcı değil.†

---

* Duyusal istifade diğer duyular için de geçerlidir. Kılıçkuyruk balığında, erkeğin kuyruk yüzgecinin alt yarısı alışılagelmişin dışında uzundur. Bu kılıç ne kadar uzunsa, dişiler erkeği o kadar çekici bulur. Fakat Alexandra Basolo, bu balığın yakın akrabası kılıçsız plati balıklarında [*swordless platyfish*] da aynı tercihin söz konusu olduğunu keşfetti.[41] Kuyruğuna yapay kılıç yapıştırdığı erkeklerin çekiciliği arttı. Yani kılıç da túngara kurbağasının gıdaklamaları gibi, zaten var olan bir tercihten istifade etmek için evrilmiş bir özelliktir.

† Ryan bir seminerde yarasalarla ilgili ilk bulgularını sunduğunda, oldukça kıdemli bir araştırmacı ona yanıldığını söylemiş. Yarasa kulakları kendi çağrılarının istisnai derecede yüksek frekanslarına ayarlıdır ve túngaranın daha pes gıdaklamalarına karşı sağır olması gerekir, demiş Profesör Kodaman. Fakat bildiğinden şaşmayan Ryan hiç de öyle olmadığını gösterdi. Yarasaların iç kulağı, diğer

Bu canlıların duyularıyla birbirlerine bu denli bağlanmış olmalarına hayret ediyorum. Nedeni ne olursa olsun bu kurbağaların atalarından birinin kulakları 2130 Hz frekansına meyletmişti. Túngara kurbağaları, sızlanışlarına gıdaklama seslerini ekleyerek bu duyusal garipliği kendi lehlerine çevirdi. Saçak dudaklı yarasalar, işitme sistemlerinde bir yarasa için alışılmadık ölçüde düşük frekansları duymalarını sağlayacak bir eklentiyle bu gıdaklamalardan faydalandılar. Kurbağanın Umwelt'i onun çağrılarını, bu çağrılarsa yarasanın Umwelt'ini biçimlendirdi. Duyular, hayvanların neyi güzel bulacağını belirler, dolayısıyla güzelliğin doğal dünyadaki biçimlenişini de etkiler.

Pek az hayvan sesi insan kulağına kuş ötüşü kadar hoş gelir ve pek az kuş ötüşü zebra ispinozlarınınki kadar ayrıntılı araştırılmıştır. Avustralya zebra ispinozu, gri kafası, beyaz göğsü, turuncu yanakları, kırmızı gagası ve gözlerinin altına rastık çekilmiş gibi görünen siyah çizgileriyle görsel açıdan çarpıcıdır. Erkekler, karmaşık ve kulak tırmalayıcı ötüşleriyle ses açısından da aynı derecede dikkat çekicidir. Onların ötüşü kulağıma melodik bir yazıcının sesi gibi geliyor. Öte yandan bu ötüşün, bir başka zebra ispinozunun kulağına da öyle gelip gelmediğini merak ediyorum. Ses perdesi bakımından bu sorunun yanıtı evettir. Kuşlarda işitmenin frekans aralığı aşağı yukarı insandakine benzediği için kuşların duyduğu perde aralığı genellikle bizimkiyle aynıdır. Fakat kuş ötüşleri olağanüstü hızlı olabilir. Bir zebra ispinozunun gagasından çıkan notalar öylesine hızlı akar ki onları birbirinden zar zor ayırt edebilirim. Duyabildiğimi *sandığım* notalarda bile sanki daha fazlası, farkındalığımın sınırlarında gizlenen, tam anlamıyla çözemediğim karmaşık bir taraf var. Kuşlar bu ötüşlerde kesinlikle benim duyamadığım bir şeyler duyabiliyor.

---

memelilerin hemen hepsine kıyasla daha fazla nöronla bağlantılıdır ve yarasalardaki benzersiz bir nöron altgrubu, kurbağa çağrılarındaki düşük frekanslara hassastır. Temel yarasa donanımına âdeta özel bir kurbağa tespit modülü eklenmiştir. Daha sonra Ryan'ın öğrencilerinden Rachel Page, yarasaların bazı koşullarda hem sızlanıp hem gıdaklayan kurbağaların yerini daha kolay bulabildiğini gösterdi.[43] Ayrıca bu seslere kulak kabartanlar yalnızca yarasalar değildir. Yine Ryan'ın öğrencilerinden Ximena Bernal, kan emen tatarcıkların kurbağa çağrılarına, özellikle de gıdaklama seslerine ilgi duyduğunu gösterdi.[44]

Kuş meraklıları uzun zamandır kuşların işitme duyusunun bizimkinden daha hızlı çalıştığından şüpheleniyorlardı.[45] Bazı kuşlar, notaların büyük bir hassasiyetle iç içe geçip birbirine dolanarak hemhâl olduğu ve iki kuşun sesinin yekvücut bir ötüş gibi duyulduğu baş döndürücü, senkronize düetler yaparak zamanlama konusundaki hünerini kanıtlar. Zebra ispinozları gibi kuşlarsa nağmeleri birbirlerini dinleyerek öğrenirler; o nedenle öğrenerek tekrarladıkları akustik ayrıntıları duyabilmelidirler. Aynısı alaycıkuş gibi taklitçiler için de geçerlidir. Islıkçı çobanaldatanın ötüşü bizim kulağımıza üç notadan oluşuyormuş gibi gelir (vuip-pur-vuil) ama aslında, yavaşlatıldığında duyabildiğimiz beş notadan (vu-ip-pur-vu-il) oluşur. Alaycıkuşun böyle bir yardıma ihtiyacı yoktur; çobanaldatanı taklit ederken beş notayı da seslendirir.[46]

Masakazu Konishi, peçeli baykuşlarla ilgili çalışmalarından önce, 1960'larda, kuşların işitme işlem hızının olağanüstü yüksek olduğuna dair doğrudan deliller buldu.[47] Serçelere hızlı tıklamalardan oluşan diziler çaldı ve o sırada beyinlerindeki işitme merkezinin nöronlarında ortaya çıkan elektriksel aktiviteyi kaydetti. Nöronlar her tıklamada –tıklamalar arasında sadece 1,3-2 milisaniye olsa bile– birer kez ateşlendi. *Saniyede* 500-700 tıklamanın duyulduğu böylesine yüksek hızlarda bir kedinin işitsel nöronları tempoyu ancak yüzde 10 civarında takip edebilir. Serçelerin nöronlarıysa kusursuz ayak uydurmuştu. Hatta ötüşleri hızlı bölümler içermeyen güvercinlerin bile kulakları görünüşe göre bu tıklamaları çözümleyebiliyordu.

Daha sonra yapılan çalışmaların sonuçları daha belirsizdi. 1970'lerden sonra Robert Dooling, kuşlarla insanların, seslerin zamansal doğasını farklı algıladıklarını göstermede tekrar tekrar başarısız oldu.[48] Örneğin kesintisiz devam eden bir sese sadece iki milisaniyelik bir es eklendiğinde, insanların bunu anlayabildiğini gösterdi. Şaşırtıcı ama kuşlar da daha iyisini yapamıyordu. Peş peşe yaptığı testlerde, "Hiçbir şey farklı çıkmıyordu," diyor Dooling. "Kuşlarda yıllar içinde zibilyon tane farklı yoldan ölçüm yaptık ama işitme duyuları hep insanlardaki gibiydi." Dooling sorunun ne olduğunu ancak uzun bir zaman sonra anladı: Kuşları, saf tonlar gibi, gerçek ötüşlerin zengin karmaşıklığının yanından bile geçmeyen basit seslerle sınıyordu. Saf tonu gözünüzde canlandırmak için yukarı aşağı dalgalanmaların zaman içinde basınçtaki

artış ve azalmaları temsil ettiği pürüzsüz bir eğri olarak düşünebilirsiniz. Bir kuş ötüşüyse daha çok, bir şehrin ufuktaki siluetine ya da bir dağ silsilesinin sırt çizgisine benzer. Tek bir nota aralığında meydana gelen son derece hızlı geçişleri temsil eden tırtıklı çıkıntılarla doludur. Zamansal ince yapı olarak bilinen bu detaylar, işitme duyusunu araştırırken kullanılan saf tonlarda bulunmaz. Anlaşıldığı üzere, ötücü kuşların asıl dinlediği şey, bu detaylardır.

Dooling, çeşitli ötücü kuşların, sadece zamansal ince yapısı farklı sesleri birbirinden ayırt edebilecekleri basit ama zekice bir deneyle bunu doğruladı.[49] Bu, sezgilerle kavranabilecek bir durum olmadığından iyisi mi görsel bir analojiden faydalanalım. Bir film çektiğinizi ve her üç karede bir sırasını tersine çevirdiğinizi hayal edin. Renk paleti aynı kalacak, sahneler aynı şekilde kurgulanacak ve olay örgüsü hâlâ anlaşılır olacaktır. Ama *bir şeyin* yanlış olduğunu hisseder, büyük olasılıkla farkı fark edersiniz. Dooling de kabaca bunu yapmıştı. Kuşlara çiftler halinde vızıltılı sesler dinletti. Seslerden biri, birkaç milisaniye tizleştikten sonra yeniden pesleşerek tekrar eden bölümlerden oluşuyordu. Diğerindeyse bölümlerin ses perdesi, aynı zaman ve frekans aralığında *pesleşiyordu.* Yavaş bir kulağa göre her iki ses de ortalama aynı perdeye denk gelir ve birbirine özdeş duyulur. Ama hızlı bir kulak ikisini tamamen farklı duyar. Dooling, insanların, bölümler ancak 3-4 milisaniyeden uzunsa bu sesleri birbirinden ayırt edebildiğini keşfetti. Kanaryalar ve muhabbetkuşlarında sınır 1-2 milisaniyedir. Zebra ispinozlarıysa 1 milisaniyelik en kısa bölümlerde bile tongaya basmaz. Bu deney, kuşların, insanların algılayamayacağı denli hızlı olan karmaşık unsurları duyabildiğini açıkça göstermişti. Ayrıca daha önceki çalışmalarıyla o kadar ters düşüyordu ki "Bu beni biraz korkuttu," diyor Dooling. Nitekim daha ileri düzeyde testler, "elektronik sistemlerimizin, kuşların ayırt edebildiği ince detaylarla başa çıkamadığı"nı gösterdi. Bu, birçok sürprizin ilkiydi.

Bir zebra ispinozunun ötüşü, hep aynı sırayla söylediği farklı hecelerden oluşur. A-B-C-D-E gibi. Beth Varnaleo ve Dooling'in öğrencilerinden oluşan bir ekip, bu hecelerden birini A-B- Ɔ -D-E şeklinde tersine çevirdiğinde zebra ispinozları hemen her seferinde değişikliği fark etmişlerdi.[50] Oysa insanlar, epey pratik yaptıktan sonra bile değişikliği fark edemediler. Fakat ekip iki hece arasındaki es süresini iki

katına çıkarınca dinleyenler bunu kolayca anlayabildi; kayıtta sorun varmış gibi duyuluyordu ve *ispinozlar* bunun farkında değildi. İnsan kulağına apaçık farklı gelen iki ötüş arasındaki farkı duyamıyorlardı.

Shelby Lawson ve Adam Fishbein adlı iki öğrenci deneyi daha da ilerlettiler. Bütün hecelerin sırasını karıştırıp C-E-D-A-B gibi yeni bir dizi oluşturdular.[51] İspinozlar ikisini *hâlâ* birbirinden ayırt edemiyordu. İki dizi birbirinden açıkça farklıydı ama *ispinozların önemseyeceği şekilde* değil. Bu kuşlar kendi hece dizilerini gençken öğrendikleri ve hayat boyu öterken aynı diziyi hiç değiştirmeden kullandıkları halde, "diziler umurlarında değildir," diyor Dooling. "Onlar için önemli olan münferit notaların içeriğidir." Sohbet ederken birbirinin kullandığı sesli harflerdeki nüanslara çok dikkat eden ama sözcüklerin sırasını takmayan iki insan gibi.

Sorumun yanıtı açık: Bir zebra ispinozunun ötüşü, bir başka zebra ispinozuna, bizim kulağımıza geldiğinden bütünüyle farklı gelir.[52] Hece dizisine aldırmamaları özellikle beklenmediktir ve kuş ötüşleriyle ilgili sezgilerimize ters düşer. Bu ötüşlerdeki diziler, insan kulağına hem güzel gelir hem de işe yarar. Kuş gözlemcileri onları belli türleri tanımlamak için kullanır. Nörobilimciler insan dilleriyle benzerliklerinden ötürü bu dizileri inceler. Oysa kuşlar, ürettikleri dizilere tamamen ilgisiz kalabilir. Bütün türler böyle davranmaz:[53] Muhabbetkuşları ince yapının yanı sıra, nota dizilerine de duyarlı görünür. Fakat Bengal ispinozları ve kanaryalar dahil birçok tür çoğunlukla ince yapıyı önemser. Onlar için ötüşün güzelliği ve anlamı ufak ayrıntılarda gizlidir. Detaylar uğruna büyük akustik resmi görmezden gelirler. Ayrıntılara boğulduklarından melodinin kendisini duyamaz ya da duyup duymamayı umursamazlar.

İnsanların eğilimi tam tersi yöndedir. Zebra ispinozunun her ötüşü kulağımıza bir öncekiyle aynı gelir ve hepsinin aynı bilgiyi taşıdığını düşünmekte haksız sayılmayız. Ama Dooling'in meslektaşı Nora Prior, özdeş görünen bu icraların ince yapısının bir ispinoza çok farklı gelebileceğini gösterdi.[54] Kayıtlardan birindeki B hecesini başka bir kayıttaki B hecesiyle değiştirdiğinde, kuşlar bir şeyin değiştiğini duyabiliyorlardı. Ötüşleri, bizim saptayamadığımız nüanslarla dolu olsa gerek. Biz aynı sabit melodinin mükerrer icralarını duyuyor olabiliriz ama onlar muhtemelen cinsiyet, sağlık, kimlik, niyet ve bundan çok daha fazlasıyla ilgili bilgileri duyuyor. Zebra ispinozları eşleriyle yaşam boyu

sürecek bağlar kurmak, ayrıldıklarında birbirlerini bulmak, yolculuğa beraber devam etmek ve ebeveynlik sorumluluklarını eşgüdümlü yürütebilmek için öterler. Belki de bütün bunları, ötüşlerinin ince yapısında kodlanmış bilgi sayesinde başarıyorlardır.

Hayvanları dinlemenin heyecanı kısmen birbirlerine ne söylediklerini merak etmemizden kaynaklanıyor. Yazarlar, diğer türlerin cıvıltılarını, melemelerini, tıslamalarını anlayabilen Dr. Dolittle gibi karakterler yaratmışlardır. Bunun bir söz dağarcığı sorunu olduğunu ve bir sözlük yardımıyla birdenbire kuş dili konuşabileceğimizi hayal etmek naiflik olur. Öyle bir sözlük yok ve Dooling'in çalışmaları bize niye olmadığını hatırlatıyor: Türler arasındaki iletişim engeli aynı zamanda duyusal bir engeldir. Kuşlar ötüşlerinin, kulaklarımızın seçemediği ve beynimizin dikkat etmediği yönlerine anlam kodlarlar. "Ötüşü kulağıma bu denli karmaşık geldiği halde, bir kuşu dinlerken anlattıklarının çoğunu *yine de* kaçırıyor olmam bence inanılmaz," diyor Dooling. "O ötüşte, bir başka kuşun anlayıp da benim anlayamadığım çok şey var."

2000'lerin başında Robert Dooling ince yapıyla ilgili ilk deneylerini yürütürken, Jeffrey Lucas kuşlarda işitme duyusunun bir diğer beklenmedik yönüyle karşılaştı. Lucas ve meslektaşları Kuzey Amerika'da yaşayan altı kuş türünün kafa derisine elektrotlar yerleştirip işitme nöronlarının farklı seslere verdiği yanıtları kaydettiler.[55] Bu basit tekniğe işitsel uyarılmış potansiyel (İUP) testi denir. Doktorlar bu testi hastaların işitme düzeyini kontrol etmek, biyologlarsa hayvanların neyi duyabildiğini anlamak için kullanır. Lucas, testi, daha karmaşık şarkılar söyleyen türlerin, daha basit melodilerle öten türlerden farklı duyup duymadığını anlamak amacıyla kullandı. Kuşları planlı olmaktan çok, tesadüfen, biri kışın diğeri ilkbaharda olmak üzere iki farklı dönemde teste tabi tuttu. Farklı zamanlardaki anlık durum görüntülerini karşılaştırdığında, ikisi arasında büyük fark olduğunu gördü. Kuşlar farklı mevsimlerde farklı duyuyorlardı.

İşitmedeki bu değişimin sebebi, bütün kulaklar için geçerli önemli bir tavizdir. Diyelim ki size biri 1000 Hz, diğeri 1050 Hz frekansında iki nota çaldım. Bu frekanslar kabaca, piyanoda en tiz ses çıkaran, bitişik iki tuşa karşılık gelir ve sesleri birbirinden kolayca ayırt edilir. Ancak her

iki notayı da 10 milisaniye süreyle çalarsam notalar ayırt edilemez hale gelir. Neden mi? Çünkü o kısacık zaman aralığında *her iki* nota da 10 kez titreşir ve sesleri aynı duyulur. Süreyi 100 milisaniyeye çıkarırsam notalardan biri 100, diğeri 105 kez titreşir ve farklı duyulur. Bu nedenle, nöronları ses bilgisini daha uzun süre boyunca bütünleştirirse, hayvan kulakları benzer frekansları birbirinden ayırt etmede ustalaşır. Ancak bunu yaparken, o süre boyunca oluşan hızlı değişimlere duyarlılıkları *azalır*. Görme duyusuyla ilgili bölümde de benzer bir ödün vermeyle karşılaşmıştık: Gözler olağanüstü bir çözünürlüğe ya da olağanüstü bir duyarlılığa sahip olabilir ama aynı anda iki özelliği birden gösteremez. Benzer şekilde kulaklar, olağanüstü bir *zamansal çözünürlüğe* ya da olağanüstü bir *perde duyarlılığına* sahip olabilir ama iki özelliğe de aynı anda sahip olamaz.[56] "Hızlı işler yapan işitsel sistem, frekansla ilgili işler yapan işitsel sistemden tamamen farklıdır," diyor Lucas. Kuşlar bunlardan birini kalıcı olarak seçmek zorunda değil. Koşullar hangisini gerektiriyorsa ona göre, ikisi arasında gidip gelebilirler.

Carolina baştankarasını, Doğu Amerika'nın büyük bölümünü onurlandıran o küçük, meraklı ötücü kuşu düşünün. Bu kuşun imzası niteliğindeki *çik-a-dii-dii* çağrısında ses perdesi ve yüksekliği, zebra ispinozlarındaki gibi hızla değişir. Bu çağrı yıl boyunca duyulabilir ama sosyal baştankaraların büyük sürüler oluşturduğu sonbaharda özellikle önem kazanır. Bu dönemde kuşların, çağrılarının ince yapısında kodladıkları bütün bilgiyi gramer bakımından incelemesi gerekir. O nedenle işitme duyuları olabildiğince hızlı çalışmalıdır; nitekim öyle olur. Lucas, sonbaharda bu kuşların zamansal çözünürlüğünün arttığını ama perde duyarlılığının azaldığını keşfetti.[57] İlkbahar gelince her şey değişir. Sürü parçalanmaya başlar, dişilerle erkekler eşleşerek kendi üreme alanlarını oluşturur. Erkek baştankaralar eşlerini cezbetmek için yıl boyunca duyulan çağrılarından çok daha basit kur şarkılarını söylemeye başlar. Bu şarkılar, her biri saf sese yakın dört notadan oluşur: *fii-bii-fii-bey*. Erkeğin albenisi, bu notaları ne kadar tutarlı söyleyebildiğine ve özellikle de *fii* ile *bii* arasındaki inişi tam olarak koruyabilmesine bağlıdır. Artık baştankaraların frekansları mümkün olduğunca keskin ve hassas biçimde işitmesi gerekir; öyle de olur. Sonbaharda hız her şeyden önemliyken, ilkbaharda duruma ses perdesi hâkim olur.

Beyaz göğüslü sıvacıkuşlarının işitme duyusu tam tersi yönde değişir.[58] Kur şarkısının (hızlı tempolu, genizden gelen bir *vaa-vaa-vaa* sesi) ince yapısı hızlı ses yüksekliğindeki değişimleri içerir. Bu yüzden baştankaradan farklı olarak sıvacıkuşunun işitmesi üreme mevsiminde *hızlanır*, perde duyarlılığıysa azalır. Her iki kuş da hangi mevsimde hangi bilginin işlenmesi daha önemliyse işitme duyusunu ona göre baştan aşağı yeniden akort eder. Sesleri ve gereksinimleri takvime göre değişir. Tabii kulakları da.

Bu değişiklikler, ötücü kuşların kulaklarındaki tüylü hücreleri doğrudan etkileyebilen östrojen gibi cinsiyet hormonları tarafından yönlendirilir. Bu da neden bazı türlerde erkeklerle dişilerin işitmesinin farklı biçimlerde değiştiğini açıklayabilir.[59] Lucas ve meslektaşı Megan Gall, dişi serçelerde mevsimsel işitmenin, baştankaralardaki gibi bir değişim geçirdiğini gösterdiler: İlkbaharda hızdan ödün verme pahasına perde duyarlılığı artar. Buna karşılık erkeklerde işitme hızı yıl boyunca aynı kalır.[60] Robert Dooling, insanların kuş ötüşlerini kuşların kendisinden farklı deneyimlediğini, Lucas ise kuşların da cinsiyete ve mevsime göre *kendi ötüşlerini* farklı biçimlerde deneyimlediğini gösterdi. İlkbaharda erkeklerle dişiler aynı melodileri farklı işitir. Umwelt'leri yıl boyunca bazen birbirine yaklaşır, bazen de birbirinden ayrılır.

Bu döngüler, estetik algılarından daha fazlasını etkiler. Daha önce hem baykuşlarda hem de *Ormia*'da gördüğümüz gibi hayvanlar, bir kulağa diğerinden biraz daha geç ulaşıp ulaşmadığına bakarak seslerin nereden geldiğini anlayabilirler. Kulakların küçük zaman farklarını saptama yetisi zayıflarsa sahiplerinin de seslerin yerini saptama becerisi azalır. O nedenle dişi bir serçenin akustik zamanlama duyusu ilkbaharda biraz yavaşladığında, akustik *alanı* da biraz bulanıklaşır.

Bu mevsimsel döngüleri 2002'de keşfeden Lucas hayret etmişti. Diğer araştırmacılar da Lucas'ın elde ettiği ilk sonuçlara inanmadılar. O sırada işitmenin büyük ölçüde değişmez olduğu düşünülüyordu. Bu duyu bazı türlerde –ne yazık ki insanlarda da– yaşlandıkça körelebilir ama daha kısa zaman ölçeklerinde değişebileceği kimsenin aklına gelmemişti.[61] Fakat tekrar tekrar gördüğümüz üzere, bir hayvanın duyularının ince ayarı çevresine göre yapılmış ve bu duyular ilgili bütün bilgiyi ortamdan çekip çıkarabilecek şekilde evrilmiştir. Çevre koşulları

mevsimden mevsime dalgalandıkça, ilgili bilgi de değişir.* Bir Kuzey Amerika kuşu için ilkbahar genellikle seks demektir. Diğer zamanlarda duyulmayan ama ilkbaharda ortalığı inleten kur çağrılarının, yılın bu zamanında dikkatle değerlendirilmesi gerekir. Sonbaharla birlikte ortalık açılır. Yırtıcılar, çıplak dallardaki küçük kuşları daha kolay görebilir. Yaklaşan tehlike sesinin yerini saptama becerisiyle yakından bağlantılı olan hızlı işitme, bu dönemde her şeyden daha önemlidir. Bir hayvanın Umwelt'i sabit olamaz çünkü hayvanın yaşadığı dünya sabit değildir.

Mantis karideslerinin dairesel polarize örüntüleri ya da ağaçpirelerinin titreşimsel şarkılarından farklı olarak kuş sesleri, insan duyularının erişiminin dışında kalmaz. Onları çokça duyarız. Baştankaraların *fii-bii-fii-bey*'leri ve sıvacıkuşlarının *vaa-vaa-vaa*'ları fonetik olarak ifade edebileceğimiz kadar barizdir. Yine de bu sinyalleri, asıl hitap ettiği dinleyicilerin anladığı şekilde anlamayız. Baştankaranın ötüşünü ister ekim ister mart ayında dinleyelim, ikisi de bize aynı gelir. Ama bir baştankaraya aynı gelmez. Duyabildiğimiz seslerin bile bu kadar çok sırrı varsa, kimbilir duyamadıklarımızda neler kaçırıyoruz?

Roger Payne peçeli baykuşlarla ilgili yeni ufuklar açan çalışmasından sonra 1960'larda ilgisini balinalara yöneltti.[64] 1971'de tarihe geçmiş iki makale yayımladı. Bunlardan biri, eşi Katy Payne ile analiz ettiği kayıtlara dayanan çalışmaları, kambur balinaların etkileyici şarkılarını ilk kez ortaya çıkardı.[65] Bu çalışma onlarca yıl sürecek araştırmaların başlangıcı oldu, balina şarkılarını kültürel bir fenomen haline getirdi, çok satan bir albüme ilham kaynağı oldu ve Save the Whales (Balinaları Kurtaralım) hareketinin kıvılcımını çaktı. İkinci çalışma, mavi balinadan sonra dünyanın ikinci en büyük hayvanı olan oluklu balinaların (Fin balinası) okyanus aşırı duyulabilen son derece düşük frekanslı sesler çıkardığını gösterdi.[66] Bu çalışma az kalsın Payne'in meslek hayatına mal oluyordu.

* *Porichthys notatus* [*plainfin midshipman fish*] türü balıkların erkekleri, dişileri kendine çekmek için uzun ve derin uğultular çıkarır ve üreme mevsiminde dişilerin kulakları ana frekanslara çok daha duyarlı hale gelir.[62] Yeşil ağaç kurbağaları, kurbağa korosunu sadece iki hafta dinledikten sonra kendi çağrılarına daha duyarlı olur.[63]

Bu tartışmalı makale, Soğuk Savaş döneminin ürünüydü. ABD Donanması, Pasifik Okyanusu ve Atlas Okyanusu'nda Sovyet denizaltılarını dinlemek için sualtı dinleme istasyonu zincirleri kurmuştu. Ses Gözetleme Sistemi (Sound Surveillance System ya da kısaca SOSUS) adıyla bilinen bu ağ, okyanustan bir yığın gürültü topluyordu. Bunların bir kısmının biyolojik kökenli olduğu açıktı. Bazıları daha gizemliydi. Tekdüze, tekrarlayıcı ve frekansı 20 Hz (standart bir piyanonun en pes tuşunun bir oktav altı) olan bir ses ise özellikle esrarengizdi.* Uğultu o kadar güçlüydü ki bir hayvandan gelme olasılığına şüpheyle yaklaştılar. Askerî kaynaklı mıydı? Sualtı tektonik etkinliğinden mi kaynaklanıyordu? Uzak bir sahile vuran dalgalardan mı geliyordu? Gerçek kaynağın ne olduğu ancak donanmada çalışan biliminsanları sesleri kaynağına kadar izlemeye başladıktan sonra, çoğu zaman bir oluklu balinayla karşılaştıkları zaman anlaşıldı.[67]

İnsanda işitme frekansının alt sınırı 20 Hz civarındadır. Bunun altındakiler infrasonik (sesaltı) frekanslar olarak bilinir; çok yüksek olmadığı sürece bu sesleri çoğunlukla duymayız.[68] İnfrasonik dalgalar, özellikle suda inanılmaz derecede uzun mesafeler katedebilir.† Oluklu balinaların da infrasonik frekanslar ürettiğini bilen Payne, bu çağrıların 13 bin mil yol katedebileceğini hesapladığında şaşkınlıktan küçük dilini yutacak gibi olmuştu.[69] Hiçbir okyanus o kadar engin değildir. Payne ile okyanusbilimci Douglas Webb, en büyük balinaların "nispeten muazzam bir okyanus hacminde belli belirsiz bir akustik temas kurabileceğini" tahmin ederek yaptıkları hesaplamaları yayımladılar. Makale sert bir tepki aldı. Önde gelen balina araştırmacıları makalenin fanteziden ibaret olduğunu söylediler. Meslektaşları, Payne'i eleştirenlerin, onun arkasından konuşup akıl sağlığını sorguladıklarını ima ediyorlardı. "Bu kadar ileri gittiğinizde insanlar doğru olduğuna inanmayı reddediyor," diyor Payne.

* İşitme aralıklarının sınırları net değildir. Mesele belli bir ses yüksekliğinde, sesi duymanın giderek zorlaşmasıdır. Örneğin insanlar, bazı infrasonik frekansları, ses yeterince yüksekse duyabilir.

† İnsanlar bu özellikten II. Dünya Savaşı'nda yararlanmışlardı. Uçakların taşıdığı patlayıcılar, uçak düşerse infilak ediyordu. Enkaz yerleri dinleme istasyonlarının yardımıyla saptanıp kurtarma ekipleri gönderilebiliyordu.

Payne'in çalışması, Chris Clark'ta daha olumlu bir izlenim bırakmıştı. Genç bir akustikçi ve eski bir korist olan Clark, Roger ve Katy Payne'in 1972'de gerçek balinaları [*right whales*] araştırmak için Arjantin'e yapacakları yolculukta ses teknisyeni olarak işe alındı. Müthiş heyecan verici ve öğretici bir zamandı. Güneyhaçı'nın altındaki bir kumsalda kamp kuran Clark, yalpalayarak geçip giden penguenlerin ve gökyüzünde dönüp duran albatrosların arasında balinaları dinlemeye başladı. Suya yerleştirdiği hidrofonlarla balinaların şarkılarını dinledi ve belli kayıtları belli bireylere atamanın yöntemini buldu. Arjantin'den Kuzey Kutbu'na dünyanın dört bir yanından kaydedilmiş balina çağrılarını derleyerek kütüphaneler oluşturmaya devam etti. Bu arada Payne'in dev balinaların okyanus aşırı konuşmalarıyla ilgili ortaya attığı fikir kafasını kurcalıyordu.

1990'larda, Soğuk Savaş'ın sona ermesi ve Sovyet denizaltılarının oluşturduğu tehdidin ortadan kalkmasının ardından Donanma, Clark'a ve diğerlerine SOSUS hidrofonlarıyla yapılan gerçek zamanlı kayıtları izleme şansını verdi. Clark, SOSUS'un topladığı seslerin görsel temsilleri olan spektrogramlar arasında, şarkı söyleyen bir mavi balinanın başka bir şeyle karıştırılamayacak kadar açık olan sinyalini gördü.[70] Daha ilk günden, tek bir SOSUS sensörüyle, bütün bilimsel literatürde tarif edilenden daha fazla mavi balina sesi kaydedilmiş olduğunu anladı.[71] Çağrılar tüm okyanusta dolanıyor ve olağanüstü uzak mesafelerden geliyordu. Clark, balinalardan birinin, sesi kaydeden sensörden 1500 mil uzakta olduğunu hesapladı. İrlanda'daki balinaların şarkılarını Bermuda'daki bir mikrofonla dinleyebilirdi. "*Roger haklıymış*, diye düşündüm," diyor Clark. "Bir mavi balinanın şarkısını okyanus havzasının her yerinden tespit etmek fiziksel olarak mümkün." Donanma analistleri açısından bu sesler günlük işin sıradan bir parçasıydı; spektrogramlarda önemsiz olarak işaretlenip göz ardı edilecek şeylerdi. Ama Clark açısından bu sesler, akıllara durgunluk veren tezahürlerdi.

Mavi balinalarla oluklu balinaların şarkıları okyanusları aşabilse de balinaların gerçekten bu mesafelerde iletişim kurup kurmadığını kimse bilmiyor. Yakındaki bireylere gönderdikleri çok yüksek sesli çağrıların çok daha uzaklara yayılıyor olması mümkün. Fakat Clark aynı notaları, çok kesin aralıklarla defalarca tekrarladıklarına dikkat çekiyor. Şarkı

söyleyen bir balina nefes almak için yüzeye çıkınca susar, dalınca aynı tempoyla kaldığı yerden devam eder. "Sebepsiz değil," diyor Clark. Çağrıların bu özelliği ona, Mars keşif araçlarının Dünya'ya veri gönderirken tekrar tekrar ve gereğinden fazla sinyal kullanmasını hatırlatıyor. Okyanus aşırı iletişim kurmak için *kullanılabilecek* bir sinyal tasarlayacak olsaydınız mavi balinanın şarkısına benzer bir şey elde ederdiniz.

Bu şarkılar başka amaçlarla da kullanılıyor olabilir. Dalgaboyu bir futbol sahası uzunluğundaki notaları saniyelerce devam edebilir. Clark bir keresinde Donanma'dan bir arkadaşına böyle bir çağrıyla neler yapabileceğini sormuştu. "Okyanusu aydınlatabilirdim," diye yanıt vermişti arkadaşı. Bununla kastettiği, uzak menzilli infrasonik dalgalardan dönen yankıları işleyerek, sualtı dağlarından deniz tabanına kadar uzak okyanus dibi manzaralarının haritasını çıkarabileceğiydi. Jeofizikçiler, oluklu balinaların şarkılarını kullanarak okyanus kabuğunun yoğunluğunu saptayabilirler elbette.[72] Ama balinalar bunu yapabilir mi?

Clark, balinaların hareketlerinde buna dair deliller olduğu düşünüyor. İzlanda ile Grönland arasındaki kutup sularında ortaya çıkan, SOSUS aracılığıyla izlediği mavi balinaların yol boyunca şarkı söyleyerek kestirmeden Bermuda'nın tropikal sularına gittiklerini görmüş. Balinaların yüzlerce mil uzaklıktaki nirengi noktaları arasında zikzak çizerek sualtı dağ silsileleri arasında slalom yaptığını görmüş. "Bu hayvanların hareketlerini izlediğinizde, sanki ellerinde okyanusların akustik bir haritası varmış gibi hissedersiniz," diyor. Ayrıca bir balinanın uzun yaşamı boyunca, zihninde tekrar tekrar duyduğu ses anılarını biriktirerek bu tür haritalar oluşturabildiğinden şüpheleniyor.[73] Zira denizin farklı bölgelerinin kendine özgü sesleri olduğunu deneyimli sonar uzmanlarından duyduğunu hatırlıyor. Clark, "Bana bir kulaklık ver, sana Labrador yakınlarında mı yoksa Biscay Körfezi açıklarında mı olduğumuzu söyleyeyim, diyorlardı. Bir insan otuz yılda bunu yapabiliyorsa bir hayvan on milyon yılda kimbilir neler yapabilir, diye düşünürdüm," diyor.

Bir balinanın işitme ölçeğini kavramak zordur. Alansal olduğu kadar zamansal açıdan da engindir. Ses dalgaları suyun altında bir dakikadan kısa bir sürede 50 mil yol kateder. Bir balina, başka bir balinanın şarkısını 1500 mil öteden duyuyorsa uzak bir yıldızın kadim ışığına bakan bir astronom gibi, aslında zaman içinde yaklaşık yarım saat öncesini dinliyor

demektir. Bir balina 500 mil uzaktaki bir dağı algılamaya çalışıyorsa kendi çağrısıyla on dakika sonra geri gelecek yankı arasında bağlantı kurmak zorundadır. Bu, akıl almaz görünebilir ama düşünün ki bir mavi balinanın kalbi, yüzeyde dakikada yaklaşık 30 kez atarken, dalış sırasında dakikada 2 kez atacak kadar yavaşlayabilir.[74] Bizimkinden çok farklı bir zaman ölçeğinde yaşadıkları kesin. Zebra ispinozu, tek bir notadaki güzelliği milisaniyeler içinde duyuyorsa mavi balina da belki aynısını saniyeler ya da dakikalar içinde yapıyordur.* Onların yaşamını hayal edebilmek için "düşünme biçiminizi tamamen farklı boyutlara esnetmeniz gerekir," diyor Clark. Birini, oyuncak teleskopla gece gökyüzüne bakmaya, diğeriniyse NASA'nın Hubble teleskobundan uzayın bütün ihtişamına tanıklık etmeye benzetiyor. Balinalar hakkında düşünürken, dünyanın uzayda ve zamanda esneyerek kendisine daha büyük göründüğünü söylüyor.

Balinalar hep bu kadar büyük değildi. Yaklaşık 50 milyon yıl önce suya dönen küçük, toynaklı, geyik benzeri hayvanlardan evrilmişlerdi. Atalarının işitme duyusu muhtemelen sıradan bir memelininki gibiydi.[75] Ama su yaşamına uyum sağladıkça, bir grup balinada –suyu süzerek beslenen mavi balinaları, oluklu balinaları ve kambur balinaları içeren dişsiz balinalarda– işitme düşük infrasonik frekanslara kaydı. Vücutları da irileşerek Dünya'da şimdiye dek ortaya çıkmış en büyük cüsseleri meydana getirdi. Bu değişiklikler muhtemelen birbiriyle bağlantılıdır. Dişsiz balinalar, kril denen minik kabukluları yiyerek hayatlarını idame ettirmelerini sağlayan benzersiz bir beslenme biçimi geliştirdikleri için bu devasa boyutlara kavuştular.[76] Kril sürüsünün içine hızla dalan mavi balina, kendi bedeni kadar büyük bir su hacmini ağzına alıp yarım milyon kaloriyi tek seferde yutar. Fakat bu stratejinin bir bedeli vardır. Kriller okyanuslarda düzenli dağılım göstermez. Dolayısıyla mavi balinalar koca bedenlerinin ihtiyacını karşılayabilmek için uzun göç yolculukları yapmak zorundadır. Onları bu uzun yolculukları yapmaya zorunlu kılan devasa boyutları, bunu yapabilmelerine imkân veren donanımı da sağlar: Diğer hayvanlarınkine göre çok daha düşük frekanslı, yüksek ve daha uzak menzilli sesleri çıkarma ve duyma yetisi.

* Pixar'ın *Kayıp Balık Nemo*'sundaki esprili bir sahnede, ana karakterlerden Dory balinaca konuşurken olağan şeyleri yüksek sesle ve yavaş yavaş söyler. Clark'la konuşurken bunun şaşırtıcı derecede doğru olabileceğini düşünüyorum.

1971'de Roger Payne, yiyecek arayan balinaların bu sesleri uzak mesafelerde birbirleriyle temas kurmak için kullanıyor olabileceğini düşünmüştü. Doyduklarında çağrıya başlıyor, açken susuyorlarsa yiyecek bulmak için okyanus havzasını hep birlikte tarayıp şanslı bireylerin bulduğu bereketli alanlara yöneliyor olabilirlerdi. Payne, bir balina sürüsünün, tek başına yüzüyormuş gibi görünseler de aslında akustik olarak birbirleriyle bağlantılı bireylerden meydana gelen, muazzam boyutlara ulaşmış çok dağınık bir ağ olabileceğini ileri sürdü. Sonraları eşi Katy, karadaki en büyük hayvanların da infrasonik frekansları benzer şekilde kullanıyor olabileceğini gösterdi.

Katy Payne, eşi Roger'la, kambur balinaların şarkı söylediğini öğrendikten 16 yıl sonra, Mayıs 1984'te kendini Oregon'un Portland kentindeki Washington Parkı Hayvanat Bahçesi'nde, Asya fillerinin arasında bulmuştu.[77] Üzerinde çalışacağı başka bir tür arıyordu; zeki ve sosyal hayvanlar olan filler iyi bir aday gibi görünüyordu. Onları gözlemlerken zaman zaman vücudunda derinden gelen bir titreme hissediyordu. "Gök gürültüsünü hissetmek gibiydi ama gök gürlemiyordu," diyordu *Silent Thunder* adlı hatıratında.[78] "Hiç yüksek ses yoktu, sadece bir sarsıntı ve sonrasında hiçbir şey." Bu duygu anılarını canlandırmış, gençliğinde bir şapel korosunda şarkı söylerken borulu orgdan çıkan en bas seslerin vücudunu nasıl sarstığını hatırlatmıştı. İnsanın algılayamadığı kadar pes sesler çıkardıkları için fillerin de kendisini aynı şekilde etkiliyor olabileceğini düşündü. Belki filler de bazı balinalar için söylendiği gibi, infrasonik frekanslarda sohbet ediyorlardı.

Payne yanında iki meslektaşı ve kayıt cihazlarıyla aynı yılın ekim ayında hayvanat bahçesine geri döndü. Ekip hayvanların davranışlarıyla ilgili durmadan not alırken kayıt cihazları da aralıksız çalışıyordu. Payne, Şükran Günü'nün akşamına dek kayıtlara el sürmedi ve dinlemeye, unutamadığı bir olayla ilgili kayıttan başladı. İki fil –grubun lideri Rosy adlı dişi ile Tunga adlı erkek– beton bir duvarın iki yanında yüz yüze durdukları sırada Payne aşina olduğu o sessiz sarsıntıyı hissetmişti. O esnada filler sessiz görünüyordu ama Payne, bu karşılaşmanın kayıtlarını hızlandırıp ses perdesini üç oktav yükseltince inek mölemelerine benzer sesler duydu.[79] Beton bölmenin ayırdığı Rosy ile Tunga,

etraftaki insanların farkında olmadığı hararetli bir sohbete dalmışlardı. Payne o gece rüyasında bir grup filin kendisini ziyaret ettiğini gördü. Sürünün lideri dişi, "Bunu başkalarına anlatasın diye açığa vurmadık," diyordu rüyasında. Payne bunu bir mahremiyet çağrısı değil, bir davet olarak yorumladı: *Bunu insanlar arasında ün kazanasın diye değil, bize erişimin olsun diye açığa vurduk.*

Payne'in 1984'te yayımladığı keşfi, Kenya'daki Amboseli Ulusal Parkı'nda Afrika filleri üzerinde çalışan Joyce Pool ve Cynthia Moss'a çok anlamlı gelmişti. İki araştırmacı, fil ailelerinin, aralarında kilometrelerce mesafe olmasına rağmen ayrı gruplar halinde, çoğu zaman haftalarca aynı yöne gittiklerini fark etmişti. Ayrıca akşamın erken saatlerinde farklı yönlerden gelen gruplar aynı su çukurunun başında toplanıyordu. İnfrasonik dalgalar, havada bile uzun mesafeler kateder; dolayısıyla fillerin haberleşmek için bu frekansları kullanması, savanadaki hareketlerini nasıl senkronize ettiklerini açıklayabilirdi. Poole ve Moss, Payne'i de kendilerine katılması için davet ettiler. Payne kabul etti ve ekip 1986'da Afrika fillerinin de tıpkı Asya filleri gibi –akla gelebilecek her bağlamda– infrasonik frekanslar kullandığını gösterdi.[80] Temas homurtuları fillerin birbirlerini bulmalarına yardım eder. Ayrılık sonrası kavuştuklarında selamlaşma homurtuları çıkarırlar. Erkekler kızıştıkları zaman homurdanır, dişiler de onlara yanıt verir. "Hadi gidelim" homurtusu, "Az önce seks yaptım" homurtusundan farklıdır. Bu homurtuların çoğu yakın mesafeden insan kulağının işitebileceği frekanslar içeriyordu ama bazıları yalnızca ekip kayıtları hızlandırdığı ya da görselleştirdiği zaman bariz hale gelmişti.[81]

Bu infrasonik homurtular hava kaynaklı seslerdir; o nedenle Caitlin O'Connell'ın nispeten yeni tanımladığı, son bölümde karşılaştığımız yüzeyde yayılan dalgalardan kısmen farklıdır. Her ikisi de çoğunlukla bizim algı sınırlarımızın dışında kalır ve her ikisi de diğer filler tarafından uzun mesafelerden tespit edilebilir. Homurtuların düşük frekanslı kısımları büyük bir balinanınkiyle hemen hemen aynı olup 14-35 Hz aralığındadır. Bu çağrılar havada, suda olduğu kadar uzağa taşınmaz ve ne kadar uzağa gidebileceklerini hava koşulları belirler. Hava ne kadar soğuk, berrak ve sakinse mesafe o kadar artar. Bir filin işitsel dünyası öğle sıcağında küçülür. Günbatımından birkaç saat sonra on kat büyür

ve teorik olarak fillerin birbirlerini kilometrelerce uzaktan duyabilmelerini sağlar.[82*] "Ancak gerçekte bu hayvanların birbirlerini ne kadar uzaktan dinlediklerini ya da neyi dinlediklerini bilmiyoruz," diyor Payne. "Çok önemli bir soru bu ve kimse yanıtlayamıyor."

Aynı durum balinalar için de geçerlidir. Roger Payne, Chris Clark ve diğerlerinin, balina davranışları hakkında küçük enstantanelere ve bu hayvanların yapabilecekleriyle ilgili bilgiyi esas alan tahminlere dayanarak ortaya attıkları kuram hâlâ büyük oranda spekülatiftir. Yeryüzünde bugüne dek yaşamış en büyük hayvanlar söz konusu olduğunda, gerçek verilere ulaşmak zor, deney yapmak hemen hemen imkânsızdır. Oysa kuşları, tam tersine, kafeste tutmak kolay olduğundan kuş ötüşleri yüzyıllardır analiz ediliyor. Buna rağmen bazı türlerin, bizim işitebildiğimiz niteliklerden feragat etmek pahasına zamansal ince yapıya dikkat ettiğini Robert Dooling ancak 2002'de keşfetti. Bir kuşun Umwelt'ini anlamak bu denli zor olduğuna göre, dev balinaların çağrılarda neye kulak verdiğini biliminsanlarının anlamakta zorlanmasına şaşmamak gerek. Bu şarkılar kur gösterisi midir? Yoksa teritoryal çağrılar mı? Ya da yemek zili mi? Veya kimlik beyanı mı? Bu soruların yanıtlarını kimse bilmiyor. Bir mavi balinaya, kaydedilmiş bir şarkıyı dinletebilseydiniz bile hayvanın nasıl davranmasını beklerdiniz?

Bir dişsiz balinanın işitme aralığını bile kimse kesin olarak bilmiyor. Bir hayvana sesler dinletip kafa derisine yerleştirilmiş elektrotlarla nöral yanıtların kaydedildiği İUP testini okyanuslarda yüzen mavi balinada kullanmak imkânsızdır. Araştırmacılar İUP'yi kıyıya vuran ya da esaret altında yaşayan daha küçük balinalarda ve yunuslarda kullanabilmişlerdir ama dişsiz balinalar nadiren kıyıya vurur ve esaret altında yaşamazlar. Darlene Ketten gibi biliminsanları doğrudan ölçümler yapmak yerine, bu devlerin kulaklarını tıbbi tarama cihazlarıyla analiz ederek ne duyduklarını tahmin etmeye çalıştılar. Ketten'ın çalışması, mavi

* Diğer kara hayvanları da Umwelt'lerinde aynı büyüme ve küçülmeleri tecrübe eder. Bu nedenle ötücü kuşlar şafak sökerken öter, kurtlarsa geceleri ulur. Gece vakti, bir yırtıcının çağrı işitme menzili artar; fillerin en sık akşamüstü çağrı göndermesinin sebebi, seslerinin epey uzaklara ulaşabildiği bu saatlerde aslanların hâlâ uyukluyor olmasıdır belki de.

balinaların, çağrılarındaki infrasonik frekansların aynısını duyduğunu kuvvetle düşündürüyor.[83] Bu duyuyu hangi amaçla kullandıklarıysa ayrı konu.

Payne ve Clark'ın fikirlerinin açık tarafları yok değil. Görünüşe göre yalnızca erkek mavi balinalar şarkı söyler. Eğer gerçekten bu çağrılarla yönlerini buluyor ve haberleşiyorlarsa o zaman dişiler ne yapıyor? Bir de oran meselesi var. Frekansı 20 Hz olan bir sesin dalgaboyu 75 metredir ki bu, iki basınç zirvesi arasındaki mesafenin, en uzun mavi balina ya da oluklu balinanın 2-3 katı uzunluğunda olduğu anlamına gelir. Had safhada büyük olan bu hayvanlar, ufacık *Ormia* sineğiyle aynı sorunu yaşar: Her iki kulak da çağrıları aynı şekilde duyduğundan, ses kaynağını takip edememeleri beklenir.[84] "İmkânsız olabilir ama şu sineğe bir bakın!" diyor Clark. "Ruhlara ya da astrolojiye inanmam ama evrimi de hafife almam. Asla kanıtlayamayacağım akıl almaz şeyler önerdiğim için bilimsel toplantılarda fazlasıyla yerden yere vuruldum. Yine de açık fikirli olmayı tercih ederim. Ve kendimi hep o hayvanın yerine koymaya çalışırım."

Filler ve balinalar insanın işitme aralığının altında kalan çağrılar üretirken, bazı türler bu aralığın üstüne çıkar. Joseph Sidebotham, 1877 kışında Fransa'nın Menton şehrinde bir otelde kalırken balkonda kanarya şakımasına benzer bir ses duydu.[85] Çok geçmeden şarkıcının aslında bir fare olduğunu keşfetti. Onu bisküviyle besledi; fare de karşılığında şöminenin yanında, kuş sesi kadar güzel bir melodiyle saatlerce şakıdı durdu. Sidebotham'ın oğlu, belki de bütün farelerin, insanların duyamayacağı kadar yüksek perdeden benzer melodiler söylüyor olabileceğini ileri sürdü. Sidebotham aynı fikirde değildi. "Farelerde şakımanın çok nadir görülen bir yetenek olduğunu düşünüyorum," diye yazmıştı *Nature* dergisine.

Yanılıyordu. Yaklaşık yüz sene sonra biliminsanları farelerin, sıçanların ve diğer birçok kemirgenin, insanların duyamayacağı kadar yüksek frekanslarda, gerçekten de geniş bir "ultrasonik" repertuara sahip olduğunu fark etti.[86] Bu hayvanlar oyun oynarken ve çiftleşirken, stres altındayken ya da üşüdüklerinde, saldırganken veya boyun eğerken bu sesleri çıkarırlar. Yuvalarından alınan yavrular ultrasonik "yardım

çağrıları"yla annelerine seslenir.[87] Sıçanlar, gıdıkladığınızda gülme sesine benzer ultrasonik cıvıltılar çıkarır.[88] Richardson'ın yer sincapları, yakında bir yırtıcı hayvan olduğunda –ya da bir yırtıcıyı taklit etmek için tekrar tekrar hasır bir şapka fırlattığınızda– ultrasonik alarm sesleri çıkarıyorlardı.[89] Dişi hormonlarının kokusunu alan erkek fareler, kuşlarınkine oldukça benzeyen, kendine has hece ve tümceciklerden oluşan ultrasonik şarkılar söyler.[90] Bu serenatların cazibesine kapılan dişiler eşlerini seçip onlarla ultrasonik bir düete başlar.[91] Kemirgenler dünyadaki en yaygın ve üzerinde en fazla çalışılmış memelilerdendir; bu hayvanlar on yedinci yüzyıldan bu yana laboratuvarların demirbaşı olmuşlardı. Onca zamandır hiç kimsenin ruhu duymadan, birbirleriyle hararetli hararetli konuşuyor, etraflarında her şeyden habersiz dört dönen araştırmacıların ve teknisyenlerin radarına yakalanmadan mesaj alışverişi yapıyorlardı.

Tıpkı *infrasonik* (sesaltı) gibi, *ultrasonik* (sesötesi) terimi de insanmerkezci bir yapmacıklık içerir. Ortalama bir insan kulağı için üst sınır olan 20 kHz'in üzerindeki ses dalgası frekansları için kullanılır.[92] Özel –hatta *ultra*– olmasının sebebi, bu sesleri bizim duymamamızdır. Ancak memelilerin büyük çoğunluğu bu aralığı gayet iyi duyar; muhtemelen bizim atalarımız da duyuyordu. Hatta en yakın akrabalarımız şempanzeler 30 kHz'e yakın frekansları duyabilir. Köpek 45 kHz'i, kedi 85 kHz'i, fare 100 kHz'i, afalina 150 kHz'i duyabilir.[93] Ultrasonik frekanslar bu hayvanlar için sadece sestir. Birçok biliminsanı bu frekansların hayvanlar için başkalarının kulak misafiri olamayacağı mahrem bir iletişim kanalı olduğunu ileri sürmüştür. Aynı iddia ultraviyole ışık için de ortaya atılmıştı. Bu sesleri duyamayız, o yüzden de başka birçok tür tarafından açıkça duyulmalarına rağmen "saklı" ya da "gizli kapaklı" olarak tanımlarız.

Rickye ve Henry Heffner, bu kadar çok memeli türünün ultrasonik frekansları duyabilmesinin sebebini başka türlü açıklıyor: Bu frekanslar hayvanların, sesin nereden geldiğini anlamalarını sağlar.[94] Peçeli baykuşlar gibi, memeliler de iki kulağa gelen sesi karşılaştırarak bunu yapar. Fakat kulaklar arasındaki mesafe azaldıkça, sadece kısa dalga boylu, yüksek frekanslı sesler için böyle bir karşılaştırma yapmak mümkün olur. Genel kural olarak, bir memelinin kafası ne kadar küçükse işitme

aralığı o kadar geniştir. İşitsel dünyamızın sınırlarını, kafatasımıza çarpan sesin fiziksel özellikleri belirler.*

Yüksek frekanslı seslerin yerini saptamak daha kolay olabilir ama onların da önemli bir kısıtlayıcılığı var. Çok çabuk enerji kaybeder, kolayca saçılabilir, yapraklar, otlar, dallar ve benzeri engeller tarafından yansıtılabilirler. Yani ultrasonik çağrılar yalnızca kısa mesafelerde yayılabilir.[96] Şarkı söyleyen bir mavi balinanın sesi okyanusun her yerinden duyulabilir ama bir farenin cıvıltısını sadece yanı başındaki komşuları işitir. Bu kısıtlılık, ultrasonik frekansları duyabildiği halde iletişimde kullanan memeli türlerinin –kemirgenler, dişli balinalar, küçük yarasalar, evcil kediler ve birkaç başka memeli– niye görece az olduğunu açıklayabilir. Ultrasonik dalgalar çok çabuk sönümlenir. (Haşereyi ultrasonik frekanslarla uzaklaştırdığı iddia edilen cihazların gerçekte işe yaramamasının sebebi de budur: Ultrasonik frekansların menzili pratik hayatta kullanılamayacak kadar sınırlıdır.)[97]

Fakat hayvanlar, dinleyicilerini sınırlandırmak istediğinde sınırlı menzil avantaj sağlayabilir. Yalnız kalmış bir fare yavrusunun yardım çağrısı, daha uzaktaki yırtıcıların dikkatini çekmeden yakındaki ebeveynini harekete geçirebilir. Böylece ultrasonik frekanslar, erişilmez bir frekans aralığında bulunduğundan değil ama fazla uzağa gidemediğinden gerçekten de gizli bir iletişim kanalı oluşturur. Sınırlı menzilin ultrasonik frekanslarla ilgili çalışmaları daha da zorlaştırmasıysa sinir bozucudur. Ultrasonik frekansları duyamıyoruz ama böyle bir yetimiz olsaydı bile duyabilecek kadar yakınında olamayabilirdik. Kemirgenlerin ultrasonik dalgaları sosyal yaşamlarında yaygın olarak kullandığını ne kadar uzun zaman sonra öğrendiğimiz göz önüne alındığında, hayvanlar arasında böyle bir iletişimin bizim düşündüğümüzden çok daha fazla kullanılıyor olması kesinlikle mümkün.

Ultrasonik iletişimin pek çok örneği, biliminsanları hayvanların çağrı esnasındaki hareketleri çıt çıkarmadan yaparak sessiz çığlıklar attıklarını fark edince keşfedildi. Marissa Ramsier de gremlinlere

* Yeraltında yaşayan hayvanlar önemli bir istisnadır.[95] Belki de seslerin yerini saptamaları gerekmediği ve bunun yerine yüzey titreşimlerini kullandıkları için bu hayvanların işitme aralığı, kafalarının büyüklüğüne göre beklenenden çok daha dardır.

benzeyen, yumruk büyüklüğündeki koca gözlü Filipin tarsiyerlerini seyrederken bunun farkına vardı.[98] Tarsiyerler ağızlarını açıyor ama hiç ses çıkarmıyordu. Ramsier, bu hayvanların çıkardığı sesleri ancak önlerine bir ultrason dedektörü koyunca duyabildi. Tarsiyerlerin çağrı frekansının 70 kHz olduğunu öğrendi. Ultrasonik sınırın epey üzerinde bir değerdi bu, hatta yarasalar ve balinalar dışındaki bütün memelilerin çağrı frekansından daha yüksekti. Ne söylüyorlardı? Birbirleri dışında kimleri dinliyorlardı?

Sinekkuşları daha da gizemlidir. Ramsier'ın tarsiyerlerle yaşadığı deneyimde olduğu gibi, sinekkuşlarının da ötmeden gagalarını açıp göğüslerini titrettiği birçok gözlemcinin dikkatini çekmişti. Kuzey Amerika'da yaşayan mavi gerdanlı sinekkuşu, kısmen duyabildiğimiz ama frekansı 30 kHz'e uzanan ve ultrasonik aralığa giren, detaylarla süslü bir şarkı söyler.[99] Bu şaşırtıcıydı çünkü Carolyn Pytte 2004'te sinekkuşlarının 7 kHz'in üzerindeki frekansları duyamadığını göstermişti. Sinekkuşu, şarkısının düşük frekanslı kısımlarını algılayabilir ama kendi şarkısının büyük bölümünü duyamaz. Kara yakalı sinekkuşu ve mor kuyruklu ormanperisi gibi sinekkuşlarının çağrıları çoğu kuşun işitme sınırını aşar ve bu ötüşlerin insanlar tarafından algılanabilen bölümleri cırcırböceği sesine benzer.[100] Çimborazo dağyıldızı daha da ileri giderek bütün bir tümceciği ultrasonik aralıkta söyler. Kuşların 10 kHz'in altında zirve yapan işitme aralıkları birbirine benzer. O halde ya bu sinekkuşlarının kulakları çok sıradışı ya da aslında gagalarından çıkanı kendileri de duyamıyor.* Eğer ikincisi doğruysa şarkıları neden bu denli tiz? Çağrılar dinleyicilere seslenir. Sinekkuşlarının nağmeleri kendi Umwelt'lerinin dışında kalıyorsa dinleyiciler kim?

Böcekler olabilir mi? Böceklerin çoğu hiçbir şey duyamasa da kulakları olanlar ultrasonik frekansları işitebilir. Yüz altmış bin güve ve kelebek türünün yarısından fazlası bunun için uygun donanıma sahiptir.[102] Büyük mum güvesi 300 kHz'e yakın frekansları duyabilir ki bu,

* Bir hayvanın kendi çağrılarını duyamaması abes gelebilir ama bunun böyle olduğunu gösteren en az bir örnek var: Brezilya'da yaşayan balkabağı kurbağası. Bu turuncu kurbağa kendi çağrılarındaki frekanslara hassas olmadığı halde, belki de şişen ses keselerinin görüntüsü dişilere cazip geldiğinden yine de çağrı gönderir.[101]

herhangi bir hayvanın işitme üst sınırı için açık ara önde bir değerdir.[103] Sinekkuşları nektarın yanı sıra böcek de yer. Kendilerinin duyamadığı ultrasonik çağrıların amacı, bu sesleri duyabilen böcekleri saklandıkları yerden çıkarmaktır belki de.

Evet ama mademki hiçbir şey duyamıyorlar, o halde niye bu kadar çok böcekte ultrasonik frekansları işitme duyusu evrildi? Evrimsel açıdan böceklere göre nispeten yeni ortaya çıkan sinekkuşlarını duymak için olmadığı kesin. Böceklerin çoğu sessiz olduğuna göre, muhtemelen birbirlerini duymak için de değil.* Büyük olasılıkla, yaklaşık 65 milyon yıl önce ortaya çıkan ezeli düşmanları yarasaları dinleyebilmek için kulakları son derece yüksek frekanslara ayarlanmıştı.[105] Yarasalarda, ultrasonik frekansları hem çağrılarda hem de işitmede kullanma becerisi evrildi ve bu iki özellik bir araya gelerek hayvanlardaki en olağanüstü duyuyu meydana getirdi.†

* Bazı güveler ultrasonik kur çağrıları gönderir.[104] Erkekler, dişinin feromon izlerini takip ederek yanına konar ve kanatlarını titreştirerek ultrasonik yaylım ateşine başlar. Bu çağrılar çok sessiz ve neredeyse fısıltı gibidir. Ultrasonik frekanslarla iletişim kuran diğer hayvanlar gibi bu güveler de muhtemelen söz konusu frekansların sınırlı menzilinden yararlanır; böylece sesini, yakındaki müstakbel eşi duyar ama tepesinde uçan aç yarasa duyamaz. Fakat ultrasonik olsun olmasın çoğu çağrının tersine bu çağrıların amacı çekici olmak değil, tehlikeliymiş izlenimi vermektir. Yarasaların çağrılarını taklit eden bu sesler, dişilerin anında donakalmasına neden olur ve erkeklerin çiftleşmesini kolaylaştırır.

† Yüzlerce ders kitabı ve bilimsel makalede yıllarca, ekolokasyon yapan yarasaların güveler ve diğer böceklerdeki kulakların evrimini yönlendirdiği iddia edildi. Fakat bu kitabı yazdığım sırada, bilim dünyasıyla birlikte ben de bu anlatının doğru olmadığını öğrendim. Güve kulakları hemen her zaman yarasanın ultrasonik frekansları kullanma yetisinden 28 ila 42 milyon yıl önce evrilmişti.[106] Ancak yarasalar sahneye çıktıktan sonra bu kulaklar daha yüksek frekanslara doğru kaydı. Duyu biyoloğu Jesse Barber bununla ilgili olarak, "Makalelerimde yazdığım giriş bölümlerinin çoğu yanlış," diyor.

9.

Sessiz Dünyadan Yansıyan Sesler

Yankılar

Ben ağır kapının camından bakarken, diğer tarafta eldivenli bir el uzun kulaklı, koyu renk Şivava suratlı kahverengi bir tüy yumağını tutup kaldırıyor. Bu, Zipper. Bir büyük kahverengi yarasa olan Zipper, yazı Boise Eyalet Üniversitesi'nde Jesse Barber'ın bakımı altında geçiren yedi yarasadan biri. Büyük kahverengi yarasalar gerçekten kahverengidir ama hepi topu bir fare kadar oldukları için ancak küçük yarasalara kıyasla büyüktürler. ABD'nin her yerinde tavan aralarını mesken tutarlar ama gececil ve sessiz olduklarından insanlara nadiren görünür, göründüklerinde de kesinlikle bu kadar yakın olmazlar. Yarasalar günbatımında ortaya çıkar, güvelerin ve gece uçan diğer böceklerin peşine düşer. Zipper'a (Fermuar) bu adın verilmesinin nedeni, manevra yapma konusunda becerikli olmasıymış. Ev arkadaşlarından bazılarının adları yiyeceklerle ilgili yakıştırmalardan geliyor: Ramen (Japon mutfağına özgü bir tür erişte çorbası), Pickles (Turşu) ve Tater (patates). Bazılarıysa kişiliklerine göre adlandırılmış: dost canlısı Casper (sevimli hayalet); konuşkan Benny (*Rent* müzikalindeki bir karakter): Bu yarasaların hepsi ekimde kış uykusuna girerken serbest bırakılacak ama o zamana kadar tombul un kurtlarıyla beslenip sıcak kafeslerde birbirlerine sokularak ve yürüyüşe çıkarılan köpekler gibi düzenli "uçuşlara" çıkarılarak rahat bir yaz geçirecekler. "Onları egzersiz yapmaları için kafeslerinden çıkarıyoruz," diyor Barber. "On altı köpekle birlikte yaşamaya benziyor."

Zipper'ı pencereden seyrediyorum; ağzını açıp şaşırtıcı uzunluktaki dişlerini gösteriyor. Bu saldırgan bir görüntü değil. Etrafını anlamaya çalışıyor. Ağzından bir dizi kısa ultrasonik atış gönderiyor. Geri dönen yankıları dinleyerek etrafındaki cisimleri ve bunların yerlerini saptamasını sağlayan bir çeşit biyolojik sonar kullanıyor.[1] Yalnızca birkaç hayvan türü bu beceriye sahiptir ve sadece iki grup becerisini mükemmelleştirmiştir: dişli balinalar (yunuslar, orkalar ve ispermeçet balinaları) ve yarasalar. Sonarı Zipper'a önünde sert bir bariyer olduğunu söylüyor; oysa Zipper o bariyerin arkasındaki büyük yaratıkları görebiliyor. (Genel kanının aksine yarasalar kör değildir.) Biraz kafa karıştırıcı olmalı ama doğruyu söylemek gerekirse Zipper'ın bu becerisi pencereleri saptaması için evrilmedi. Görüşün sınırlı olduğu gece vakti küçük böcekleri bulabilmesi için evrildi. Gündüzleri, keskin gözlü yırtıcı kuşlar böcekleri dilediğince avlar ama geceleri avlanma sırası yarasalara gelir.[2] Onları nadiren gördüğümüz için yarasaların, kuşların geride bıraktığı artıkları geceleri yiyen ikinci sınıf ekolojik ünlüler olduğunu sanma yanılgısına düşebiliriz. Gerçekte tam tersi olur: Bazı yağmur ormanlarında yaşayan yarasalar, kuşların yediğinin iki katı böcek yer.[3] Bakıcıları Zipper'ı yandaki uçuş odasına götürüp serbest bıraktıkları zaman niye öyle olduğunu anlamaya başlıyorum.

Tamamen karanlık olan uçuş odasını üç kızılötesi kamera izliyor. İçerideki bakıcılar sadece kanat seslerini duyabiliyorlar. Dışarıdaki herkes –Barber, öğrencisi Juliette Rubin ve ben– odada olan biteni ekrandan izleyebiliyoruz. Karanlığın engel olamadığı Zipper'ın, havayı yararak uçarken güve üstüne güve yakaladığını görüyoruz. Rubin ile Barber dışarıda, heyecanlı taraftarlar gibi haykırıyor, alkışlıyorlar.

RUBIN: Yakaladı mı? Hayır, yalnızca dokundu.
BARBER: İşte oldu… AAAAAAA.
RUBIN: İkinci kez dokundu. Üçüncü. Yakalayacak. Bu yarasa bir harika.
BARBER: Güve de bayağı iyi ama…
RUBIN: HEY, yakaladı. Biliyordum!
TELSİZDEKİ BAKICI: Yakaladı mı?
RUBIN: Evet, yakaladı, çok yetenekli.

BARBER, BANA: Yemesi biraz zaman alır.

RUBIN: Bu yarasa iki ay güvesi, birkaç mum güvesi, üstüne de bir yığın un kurdu yedi. Doymak bilmiyor.

[Zipper mola verirken, ekip Poppy'yi (başka bir yarasa) koyduğu odaya bir güve daha bırakıyor.]

RUBIN: Tamam, başlıyoruz. Uuuuu, güzel. Vaaay! Aman Tanrım. Şuna bakın . . . OFF, az önce ne biçim hızlandı *gördünüz mü?*

BEN DAHİL HERKES: VAAAY!

Ekrandaki görüntüler tek renk ve grenli ama Barber bana dizüstü bilgisayarında çok daha iyi kameralarla çektiği videoları gösteriyor. HD görüntüde bir kırmızı yarasa yavaş çekimde iki ters takla atıp kuyruğuyla yakaladığı güveyi ağzına götürüyor. Bir yaprakburunlu yarasanın yakaladığı başka bir güvenin kanat pulları havada uçuşuyor. Bir soluk yarasa, bir akrebin üzerine ejderha gibi iniyor. Bu yarasalar hallerinden memnun ve muhteşem görünüyorlar. "Araştırmalarımdan bahsettiğimde çoğu insanın ilk tepkisi 'O şeylerle nasıl çalışabiliyorsun?' oluyor," diyor Rubin. "Yarasalar, yaptıkları işte o kadar olağanüstüler ve yaparken o kadar iyi görünüyorlar ki insanların onları genellikle çirkin bulduğunu unutuyorum." O kadar yanlış anlaşılıyor, o kadar sık kötülüğün simgesi olarak kullanılıyorlar ve gerek yaşadıkları yükseklik gerek gün içinde aktif oldukları zaman açısından bizden o kadar farklılar ki "En temel biyolojik özelliklerinden bazılarını bile bilmiyoruz," diye ekliyor Barber. "Yarasalar okyanusun derinliklerinde de yaşayabilirdi. Sonarları hakkında, yaşamlarının başka hiçbir yönü hakkında bilmediğimiz kadar çok şey biliyoruz."

Sonarlarından da uzun zaman haberimiz olmadı. 1790'larda İtalyan rahip ve biyolog Lazzaro Spallanzani, yarasaların, tutsak bir baykuş için fazlasıyla karanlık olan yerlerde bile yönünü bulabildiğini fark etti.[4] Yaptığı bir dizi zalimce deneyde yarasaların, gözleri kör edildiğinde dahi yönlerini bulabildiğini ama kulakları sağır edildiğinde ya da ağızları tıkandığında cisimlere çarptığını gösterdi. Bu ilginç bulguların

anlamına hiçbir zaman vakıf olamadı ve sadece şunu yazabildi: "Yarasanın kulağı, görme ya da en azından mesafeleri ölçme açısından gözlerinden daha verimli çalışır." Çağdaşları onun bu fikriyle alay ettiler; hatta bir filozof "Yarasalar kulaklarıyla görebildiğine göre, gözleriyle mi işitiyor?" diye sorarak dalga geçti.

Bu gözlemlerin ne anlama geldiği yüzyıldan uzun süre anlaşılamadı.[5] Derken Donald Griffin adlı genç bir lisans öğrencisi zekice bir fikir öne sürdü.* Griffin göç eden yarasalar üzerinde saatlerce çalışmıştı; karanlık mağaralarda sarkıtlara toslamadan uçmalarına hayret ediyordu. Yarasaların yüksek frekanslı seslerden dönen yankıları dinlediğine dair henüz sınanmamış bir varsayım kulağına çalınmıştı ve o yörede yaşayan bir fizikçinin ultrasonik sesleri saptayıp işitilebilir frekanslara dönüştüren bir cihaz icat ettiğini biliyordu. Griffin 1938'de elinde bir kafesle adamın ofisine gitti ve kafesteki küçük kahverengi yarasaları dedektörün önüne koydu. Griffin, bir klasik haline gelen *Listening in the Dark* adlı kitabında "Hoparlörden gelen kulak tırmalayıcı ses potpurisini duyunca hem şaşırdık hem sevindik," diye yazacaktı.[7]

Bir yıl sonra Griffin ve üniversiteden arkadaşı Robert Galambos, yarasaların uçarken de aynı ultrasonik çığlıkları attığını, kulaklarının bu frekansları saptayabildiğini ve önlerine çıkan engellere çarpmamak için her iki becerinin de gerekli olduğunu doğruladı.[8] Ağzı ve kulakları kapatılmayan yarasalar, tavana asılı ince tellerden oluşan bir labirentin içinde zorlanmadan uçabiliyorlardı. Ama kulakları tıkanıp ağzı kapatılan yarasalar havalanmak istemiyor, havalandıktan sonra da duvarlara, eşyalara, hatta Griffin ve Galambos'a çarpıyorlardı. Hayvanların kendi çağrılarının yankılarını dinleyerek yön bulduğu açıktı. Bazıları bunun akıl almaz olduğunu düşünüyordu. Griffin yaşananları daha sonra

* Akademisyenler yüzyılı aşkın bir zaman boyunca, yarasaların geceleri kanatları etrafındaki hava akımlarını hissederek yön bulduğunu iddia ettiler.[6] 1912'de bu fikirden yola çıkan Hiram Maxim (tam otomatik makineli tüfeği yeni icat etmişti) biraz daha farklı düşünerek yarasaların, kanat çırpma sırasında oluşan düşük frekanslı seslerin yansımalarını hissettiğini ileri sürdü. Fizyolog Hamilton Hartridge'in 1920'deki isabetli tahminine dek yarasaların yüksek frekanslı seslerin yankılarını dinlediği bilinmiyordu. Griffin'in kulağına çalınan varsayım buydu.

şöyle anlatmıştı: "Bilimsel bir toplantıda sunumumuzu dinleyen seçkin bir fizyolog, yaşadığı şokun etkisiyle Bob'u [Galambos] omuzlarından tutup sarsarak 'Ciddi olamazsınız!' diye sitem etmişti." Ama ikili ciddiydi ve 1944'te Griffin, yarasanın bu şaşırtıcı becerisine bir isim verdi: Ekolokasyon.[9]*

Griffin bile başlangıçta ekolokasyonu hafife almıştı. Onu sadece, yarasaları olası çarpışmalara karşı ikaz eden bir uyarı sistemi olarak düşündü. Ama 1951 yazında düşüncesi değişti. Ithaca'da bir gölün yakınında ilk kez doğadaki yarasaların ekolokasyonunu kaydetmeye başladı.[10] Mikrofonunu gökyüzüne doğrultunca ne kadar çok ultrasonik çığlık duyduğunu ve bunların kapalı alanlarda tanık olduklarından ne kadar farklı olduğunu görünce şaşkınlıktan dili tutuldu. Yarasalar açık havada gezinirken daha uzun ve tekdüze atışlar gönderiyorlardı. Çıkardıkları sabit *pat-pat-pat* sesleri, böceklere saldırdıkları sırada hızlanıp birleşerek kesik kesik duyulan bir vızıltıya dönüşüyordu. Bir sapanla yarasaların önüne çakıl taşları fırlatan Griffon, ne zaman havada uçan bir nesnenin peşine düşseler ultrasonik atışların her seferinde aynı sırayla hızlandığını doğruladı. Ekolokasyonun sadece bir çarpışma dedektörü olmadığını fark etmesi onu şaşırtmıştı. Yarasalar avlanmak için de bu yöntemi kullanır.[11] "Bilimsel hayal gücümüz, [bu] olasılığı bir spekülasyon olarak bile göz önünde bulundurmayı başaramadı," diye yazmıştı daha sonra.[12]

Griffin yarasaları doğal ortamlarında incelemek için bir steyşın arabayı mikrofonlar, tripodlar, parabolik reflektörler, telsizler, sustucu takılmış bir jeneratör, benzin bidonları ve 60 metre uzunluğunda uzatma kablosuyla sıkış tepiş doldurmuştu. O zamandan bu yana teknolojiyle birlikte ekolokasyon çalışmaları da ilerledi. Griffin'in 1938'de kullandığı ultrason dedektörü türünün tek örneğiydi (Galambos'la birlikte dedektörü geçici olarak bozduklarında Griffin dehşete düşmüştü). Seksen yıl sonra Cindy Moss'un Baltimore'da, son teknolojiyle donatılmış laboratuvarını ziyaret ettiğimde, iki uçuş odasından sadece birinin

* Hollandalı biliminsanı Sven Dijkgraaf da benzer çalışmalar yapıyordu. Fakat Almanya'nın Hollanda'yı işgal etmesi ve savaşın Atlantik'in iki yakası arasında bilimsel iletişimi engellemesi nedeniyle Dijkgraaf, Griffin ile Galambos'un yaptıklarından haberdar değildi ve bir ultrason dedektörüne erişimi yoktu.

duvarlarında 21 ultrason mikrofonu sayıyorum. Kızılötesi kameralar yarasaların uçarken filmini çekiyor. Dizüstü bilgisayarlar yarasaların duyulmayan seslerini görülebilir spektrogramlara dönüştürüyor ve bu görüntüler, deneyimli araştırmacıların yarasaları tek tek ayırt etmek için kullanabilecekleri kadar kusursuz. Sözgelimi birini kekelemesinden, bir başkasını alışılmadık ölçüde pes olan bariton sesinden tanıyabiliyorlar.

Bütün bu alet edevat, bir zamanlar insan kulağının saptayamadığı, bize inanılmaz gelen ekolokasyonu tüm duyular içinde en erişilebilir olanlardan biri haline getiriyor. Elbette "Yarasaların neyi algıladığını henüz bilmiyoruz," diyor Moss. "Bu gerçekten önemli bir sorun." Thomas Nagel'ın "Yarasa Olmak Neye Benzer?"de tartıştığı, diğer hayvanların bilinçli deneyimlerini hayal etmenin doğası gereği olmasından kaynaklanan felsefi ikilemle bunun aynı şey olduğunu söylüyorum.

"Doğru," diyor Moss ve muzip bir gülümsemeyle ekliyor: "Asla öğrenemeyeceğimizi düşünmüş olması dışında."

1400'ü aşkın yarasa türü var. Hepsi uçar. Çoğu ekolokasyon yapar.* Ekolokasyon, şimdiye dek karşılaştığımız duyulardan farklıdır çünkü çevreye enerji vermeyi gerektirir. Gözler tarar, burunlar koklar,

* Yarasaların kökenini net olarak bilmediğimiz için ekolokasyonun kökenleri de belirsizdir.[13] Yarasa iskeleti genellikle küçük ve kırılgan olduğundan, bu hayvanlardan geriye ataları hakkında ipucu verebilecek pek az fosil kalır. Günümüzde yaşayan yarasalar ne kadar çeşitli olurlarsa olsunlar fiziksel açıdan farklı olmaktan çok birbirlerine benzerler; bu yüzden, farklı gruplar arasındaki evrimsel ilişkileri çözmek zordur. O nedenle yarasaların ekolokasyon yapmaya ilk ne zaman başladığı, o sırada zaten uçup uçmadıkları, ekolokasyonu başlangıçta engellere çarpmaktan kaçınmak için mi yoksa avlanmak için mi kullandıkları ve bu becerinin evrim boyunca kaç kez ortaya çıktığı gibi sorular hararetli tartışmalara konu olmaktadır. Geleneksel olarak yarasaların aile ağacında biri, ekolokasyon yapan daha küçük yarasaları, diğeriyse bir istisna dışında ekolokasyon yapmayan nispeten büyük meyve yarasalarını içeren iki ana dal bulunur. Artık bunun yanlış olduğunu biliyoruz. Genetik verileri içeren en güncel aile ağacında, nalburunlu yarasalar ve yalancı vampir yarasalar gibi küçük yarasaların bir kısmı, meyve yarasalarının bulunduğu dala geçmiştir. Bu, akademik dünya için büyük bir haber. Eğer doğruysa o zaman ekolokasyon ya bütün yarasaların ortak atasında bir kez evrildikten sonra meyve yarasalarında kaybolmuş ya da birbirinden bağımsız olarak iki kez evrilmiş olmalı.

bıyıklar titreşir ve parmaklar dokunur ama bu duyu organları dış dünyada zaten var olan uyaranları toplar. Ekolokasyonu kullanan bir yarasaysa tersine, daha sonra saptayacağı uyaranı kendi yaratır. Çağrı olmadan yankı da olmaz. Yarasa araştırmacısı James Simmons'ın dediği gibi, ekolokasyon, çevremizdeki her şeyin kendini göstermesini sağlamanın bir yoludur. Bir yarasa "Marko" derse çevresi kendini "Polo" demekten alamaz. Yarasa konuşur ve sessiz dünya ona karşılık verir.

Temel süreç basit görünür.[14] Yarasanın çağrısı yayılır, çevresinde ne varsa çarpıp yansır ve hayvan geri dönen kısmı saptayıp yorumlar. Fakat bir yarasa bunu başarmak için pek çok güçlüğün üstesinden gelmek zorundadır. Ben en az on tane sayabiliyorum.

Öncelikle, mesafe bir sorundur. Bir yarasanın çağrısı hedefe vardıktan sonra yarasanın kulaklarına dönebilecek kadar güçlü olmalıdır. Oysa sesler, özellikle de yüksek frekanslı olanlar, havada yol alırken çabuk enerji kaybeder. O nedenle ekolokasyon sadece kısa menzilli çalışır. Ortalama bir yarasa küçük güveleri olsa olsa 6-9 metre mesafeden, büyük güveleriyse ve 10-12 metre mesafeden tespit edebilir.[15] Daha uzaktaki herhangi bir nesneyi, bir bina ya da ağaç gibi çok büyük bir şey olmadığı sürece muhtemelen algılayamaz.[16] Hatta çeperde kalıyorlarsa saptanabilir bölgedeki cisimler bile bulanık görünür. Çünkü yarasalar çağrılarının enerjisini, kafalarından öne doğru uzanan, fener ışığı huzmesi gibi konik biçimde yoğunlaştırır. Bu da seslerin yitip gitmeden önce uzağa taşınmasına yardım eder.[17*]

Bunda ses yüksekliğinin de etkisi olur. Annemarie Surlykke, büyük kahverengi yarasanın sonar çağrısının, ağzından çıkarken 138 desibel şiddetinde, yani kabaca bir siren ya da jet motoru kadar yüksek olduğunu gösterdi.[19] Fısıldayan yarasalar bile sessiz olmalarını beklediğimiz halde, elektrikli testere ve yaprak üfleme makineleriyle aşık atan 110 desibellik çığlıklar koyverir.[20] Bunlar, tüm karasal hayvanların çıkardığı sesler arasında en yüksek olanlardandır ve şükürler olsun ki işitemeyeceğimiz kadar tizdir. Kulaklarımız ultrasonik frekansları

* Büyük kahverengi yarasa, biri öne, diğeri aşağı bakan iki boynuzlu bir çatal sonar ışını oluşturur.[18] Ön boynuzu böcekleri ve engelleri taramak, aşağı bakan boynuzuysa yerden yüksekliğini takip etmek için kullanıyor olabilir. Bu sistem, alıcı kuşların, biri ufku tarayan, diğeri avı izleyen iki fovealı gözlerini anımsatır.

saptayabilseydi Zipper'ı dinlerken acıyla kıvranıyor olurdum; Donald Griffin ise herhalde Ithaca Göleti'nin dayanılmaz curcunası karşısında tabanları yağlardı.

Ancak yarasalar kendi çağrılarını duyabilirler ki bu da ikinci bariz zorluğu yaratır: Kendi çığlıklarıyla kendilerini sağır etmekten kaçınmak zorundadırlar. Bunun için orta kulak kaslarını uygun zamanda kasarlar. Böylece çığlık atarken işitmeleri duyarsızlaşıp yankı geldiğinde eski haline döner.[21] İşin daha da hoş yanı, yarasalar kulaklarının duyarlılığını bir hedefe yaklaşırken ayarlayabilir, böylece geri dönen yankıları, ne kadar yüksek olursa olsun aynı sabit şiddette algılayabilirler. Akustik kazanç kontrolü olarak adlandırılan bu durum, muhtemelen yarasanın hedef algısını dengede tutar.[22]

Üçüncü sorun hızla ilgilidir. Her yankı, anlık bir görüntü oluşturur. Yarasalar o kadar hızlı uçar ki hızla yaklaştıkları engelleri ya da hızlı kaçan avı tespit edebilmek için bu anlık görüntüleri düzenli olarak güncellemeleri gerekir. John Ratcliffe, yarasaların, saniyede 200 kez kasılabilen –bütün memeli kasları içinde en yüksek hıza sahip– ses kaslarıyla bunu yapabildiğini gösterdi.[23*] Bu kaslar her zaman bu kadar hızlı kasılmaz. Ancak yarasa hedefine doğru atılırken, her kaçış ve dalış manevrasını hissetmesi gereken son anlarda, süper hızlı kasları elverdiğince çok ultrasonik atış yapar. Buna son vızıltı denir. Griffin'in Ithaca Göleti'nde ilk kez duyduğu ses buydu. Son vızıltı, hem avını olabildiğince net biçimde hisseden bir yarasanın hem de muhtemelen hayatının sonuna gelmiş bir böceğin sesidir.

Hızlı atışlar üçüncü soruna çözüm üretirken dördüncü sorunu yaratır. Ekolokasyonun işlemesi için yarasanın her çağrıyı dönen yankısıyla eşleştirmesi gerekir. Çağrılarının çok hızlı olması, çağrılarla yankıların örtüştüğü ve birbirinden ayrılamadığı, dolayısıyla yorumlanamadığı bir keşmekeş yaratma riski taşır. Yarasaların çoğu bu sorundan kaçınmak için çağrılarını çok kısa tutar; örneğin büyük kahverengi yarasanın çağrıları birkaç milisaniye sürer. Ayrıca çağrılarını aralıklı gönderir

* Ne var ki yarasanın saniyede defalarca açıp kapattığı ultrasonik atışları bir dizi stroboskopik anlık görüntü oluşturur. Tıpkı statik karelerin peş peşe hızla göründüğü bir filmi izlerken beynimizin yaptığı gibi, yarasa beyninin de bu anlık görüntüleri düzgün ve kesintisiz biçimde bir araya getirmesi mümkün görünüyor.

ki her çığlığı, bir öncekinin yankısı döndükten sonra atabilsin. Büyük kahverengi yarasayla hedefi arasındaki havada ya bir çağrı gidiyor ya da yankı dönüyordur; ikisi asla aynı anda olmaz. Yarasanın kontrolü o kadar ince ayarlıdır ki o hızlı son vızıltıda bile çakışma olmaz.

Yarasanın dönen yankıları anlamlandırması gerekir. Beşincisi, şimdiye kadar gördüklerimiz arasında en büyük sorundur. Büyük kahverengi yarasanın ekolokasyonla bir güveyi kovaladığı basit bir senaryo düşünelim. Yarasa gönderdiği çağrıyı duyar. Biraz sonra da yankısını duyar. Aradaki gecikmenin süresi yarasaya, böcekle arasındaki mesafe hakkında bilgi verir. James Simmons ile Cindy Moss'un gösterdiği gibi, yarasanın sinir sistemi o kadar duyarlıdır ki saniyenin bir ya da iki milyonda biri kadar bir gecikmeyi bile saptayabilir; bu süre fiziksel olarak bir milimetreden daha kısa bir mesafeye karşılık gelir.[24] Yarasa, sonarını kullanarak hedefle arasındaki mesafeyi, bizim keskin gözlerimizle yapabileceğimizden çok daha hassas ölçer.*

Ama ekolokasyon mesafeden fazlasını verir. Güvenin biçiminden ötürü yankılar baş, gövde ve kanatlarından az da olsa farklı gecikmelerle döner. Bu da yetmezmiş gibi büyük kahverengi yarasa avlanırken bir veya iki oktavlık geniş bir frekans bandını kapsayan bir çağrı gönderir. Tüm bu frekanslar, güvenin çeşitli kısımlarından az çok farklı biçimlerde yansır ve yarasaya farklı bilgi parçaları sunar.[25] Düşük frekanslar kaba özellikler hakkında fikir verir; yüksek frekanslarsa ince detayları belirler. Yarasanın işitme sistemi, *frekans bileşenlerinden her biri için* çağrıyla çeşitli yankılar arasındaki zaman boşluklarından oluşan tüm bu bilgiyi bir şekilde çözümleyerek güvenin daha kesin ve ayrıntılı bir akustik portresini oluşturur. Böceğin konumunu bilir ama bunun yanı sıra, büyüklüğünü, biçimini, dokusunu ve yönelimini de biliyor olabilir.[26]

Yarasa ve güve hiç hareket etmeseler bile bunların gerçekleşmesi zaten yeterince zordur. Öte yandan ikisi de genellikle hareket eder. Bu da beraberinde altıncı sorunu getirir: Yarasa sonarını sürekli ayarlamak zorunda kalır.[27] Dahası, ilkin bir güve bulmak için açık havada geniş bir alanı taraması gerekir. Bu arama aşamasında, enerjisi dar bir frekans bandında yoğunlaşan yüksek sesli, uzun ve seyrek atışlar şeklinde,

* Yarasaların çağrılarını kısa tutmalarını bir nedeni de budur: Mesafeyi zamana göre hesapladıkları için daha kısa bir çağrı, daha kesin bir menzil tahmini verir.

mümkün mertebe uzağa ulaşan çağrılar gönderir. Yarasa ümit vaat eden bir yankı duyunca olası hedefe yaklaşır ve strateji değiştirir. Hedefi hakkında daha fazla ayrıntı toplamak ve aralarındaki mesafeyi daha doğru tahmin edebilmek için çağrı frekanslarını genişletir. Hedefin konumunu daha hızlı güncelleyebilmek amacıyla daha sık çağrı gönderir ve yankılarla çakışmasını önlemek için her çağrıyı kısaltır. Sonunda yarasa öldürmek için son hamleyi yaparken, mümkün olduğunca çabuk bilgi alabilmek için son vızıltıyı oluşturur. Ayrıca o an geldiğinde bazı yarasalar sonar ışınını, dolayısıyla duyu alanını genişleterek yana kaçmaya çalışan güveleri daha kolay yakalar.

Başlangıçtaki arama aşamasından son vızıltıya kadar bütün avlanma süreci saniyeler içinde olup bitebilir. Yarasalar, stratejik olarak algılarını kontrol edebilmek için çağrılarının süresini, sayısını, şiddetini ve frekanslarını tekrar tekrar ayarlar. Bu da çıkardığı sesin yarasanın niyetini belli ettiği anlamına gelir. Çağrı uzun ve yüksek sesliyse uzaktaki bir şeye odaklanmıştır. Çağrı yumuşak ve kısaysa dikkatini yakındaki bir şeye vermiş demektir. Atışlar hızlıysa hedefe daha fazla kilitlenmiştir. Araştırmacılar, bu çağrıları gerçek zamanlı ölçerek handiyse bir yarasanın aklından geçenleri okuyabilir.

Bu yaklaşım, yarasaların yedinci güçlükle, çok fazla detayla dolu dağınık ortamlarla nasıl başa çıktığını anlamamıza yardımcı olmuştur. Yarasalar girintili çıkıntılı mağaralarda, iç içe geçmiş dallar arasında, hatta tavandan asılı zincir labirentlerinde hızlı uçabilir.[28] Bu karman çorman alanlar, görme duyusu için olmasa da sonar için özel sorunlar çıkarır.[29] Bir yarasanın, kendisine eşit uzaklıktaki iki dala doğru uçtuğunu düşünün. Yarasa görebilseydi dalların her birinden yansıyan ışık retinasının farklı yerlerine düşeceği için dalları kolayca birbirinden ayırt edebilirdi. Mekân hissi yarasanın göz anatomisinin temel bir unsurudur. Ama bu, kulaklar için geçerli değildir. Yarasa, yankılarının zamanlamasından mekânı *hesaplamak* zorundadır ve eşit uzaklıktaki iki daldan dönen yankılar kulağına aynı gecikmeyle ulaşacağı için aynı nesneden dönüyormuş gibi duyulabilir.

Cindy Moss, yarasaların bu sorunu nasıl çözdüğünü göstermek için büyük kahverengi yarasalara, ağdaki bir delikten geçmeyi öğretti. Hayvanların, sonar ışınlarının merkezini kenarlara odaklayarak deliği taradıktan sonra içinden son sürat geçtiğini gördü. "Tıpkı bizim bir odadaki

cisimleri gözlerimizle taramamız gibi, yarasa da aynı şeyi sonar ışınını yönlendirerek yapar," diyor. Moss, yarasaların engellerin etrafından uçmak ya da düzensiz hareket eden hedefleri kovalamak gibi zorlu işler yaparken, çağrılarını kısaltıp frekans aralıklarını genişleterek yankılardan olabildiğince fazla ayrıntı yakalamaya çalıştıklarını da keşfetti.[30] Yarasalar, çağrılarını, Moss'un sonar atış grupları olarak adlandırdığı kümelere ayırma eğilimindedir[31] (*ba-ba-ba-ba… ba-ba-ba-ba… ba-ba-ba-ba*). Her grubu bir birim olarak işleyen yarasa yankıların tüm bileşenlerinden gelen ayrıntıları toplayarak çevrenin daha net bir temsilini oluşturur.*

Görme duyusunda olmayıp ekolokasyonda olan başka bir sorun daha var (sekizinci sorun). Gözler, bir arkaplana karşı nesneleri seçmekte, nesne kamufle olmadığı sürece sorun yaşamaz. Ama sonarda, geniş bir arkaplana karşı küçük nesneler kendiliğinden kamufle olur. Güve bir yaprağın önünde uçuyorsa ya da üzerine konmuşsa yapraktan gelen kuvvetli yankılar, güveden gelen nispeten zayıf yankıları boğar. Yarasaların bu soruna ürettiği birkaç çözümden en etkileyici olanı, yaygın büyük kulaklı yarasanınkidir. Bu yarasa, bir yaprağın üzerindeki yusufçukları ve diğer böcekleri, hareketsiz ve sessiz olsalar bile sadece ve sadece sonarını kullanarak yakalayabilir. Biliminsanları uzun zamandan beri bunun imkânsız olduğunu düşünüyorlardı. Inga Geipel, yarasanın bu inanılmaz numarayı çekerken avına dar açıyla yaklaştığını, böylece böcekten gelen yankıların yarasaya geri döndüğünü ama yapraktan gelenlerin yarasadan uzaklaştığını keşfetti.[33] Yarasa bu etkiyi güçlendirmek için böceğin önünde başını hedefine kilitleyip yukarı aşağı hareket eder. Başlangıçta muhtemelen, avına dair küçücük bir ipucu veren hayal meyal bir şeyler duyar. Ama aşağı yukarı hareket ederek farklı açılardan bilgi topladıkça öğünün şekli netlik kazanır ve böceğin şansına, imkânsız gibi görünen şey bir anda mümkün hale gelir.

Dokuzuncu sorun, çoğunlukla olduğu gibi yarasalar grup halinde uçarken ortaya çıkar. Bu durumda kendi çağrılarının yankılarını

* Olay yeri daha da karmaşıksa büyük kahverengi yarasalar, sonar atış gruplarındaki münferit çağrıların frekanslarını kaydırarak daha da fazla ayrıntı elde edebilirler. Bazı yarasa türleri böyle bir "frekans sıçraması" yapar: Kestane kesekanatlı yarasası, frekansı giderek artan üçlüler oluşturduğu için do-re-mi yarasası olarak da bilinir.[32]

diğerlerininkinden ayırt etmeleri gerekir. Bu yüzden büyük kahverengi yarasalar çağrı gönderirken diğer yarasaların uzağında bir yeri hedef alır, diğer yarasaların sesleriyle örtüşmemesi için çağrı frekanslarını kaydırır ya da sırayla sessizce uçarlar.[34*] Ancak bu gibi stratejiler, milyonlarca bireyi kapsayan gruplar oluşturan Meksika serbest kuyruklu yarasalarına daha az fayda sağlar. Yirmi milyon yarasa bir mağaradan akın akın boşalırken her biri onca yankı içinde kendininkileri nasıl seçer? Araştırmacılar bunu "kokteyl partisi kâbusu" olarak adlandırıyor; yarasaların bu kâbustan nasıl uyandıkları bilinmiyor.[37] Sadece belli bir zaman aralığında ya da belli bir yönden gelen yankıları işleme tabi tutuyor olmaları mümkün. Ekolokasyonu bütünüyle göz ardı edip diğer duyularına ya da belleklerine güveniyor da olabilirler. Meksika serbest kuyruklu yarasaları muhtemelen mağaraya giriş çıkış yolunu bilir ve yankılara başvurma ihtiyacı duymadan doğru güzergâhı izler. Onların bu özelliği, güvenlik gerekçesiyle mağaraların girişine barikat kuran insanların sonrasında yarasaların bu kapılara çarpıp öldüğünü fark ettiği, tarihteki pek çok örneği de açıklar.[38]

Bu trajik aksilikler, ekolokasyonla ilgili onuncu sorunu yansıtır: Diğer dokuz sorunu çözmek için çok çaba harcamak gerekir. Ekolokasyon, özellikle de yarasalar her şeyi hızlı yaptıklarından, zihinsel açıdan zahmetlidir. Yarasalar, sonarlarını tam kapasiteyle kullanmaya çoğunlukla zaman bulamadıkları için sık sık kendilerine yakışmayan gülünç hatalar yapar.[†] Pütürleri arasında yarım milimetre fark olan iki zımpa-

---

* Yarasalar birbirleriyle iletişim kurarken, genellikle sonar olarak kullandıklarından çok farklı çağrılar gönderir. Buna rağmen iletişim ile ekolokasyon arasındaki fark çok net değildir. Bazı yarasalar, tanıdık bireylerin sonar çağrılarını tanıyabilir ve birbirlerinin beslenme vızıltılarına kulak kabartır.[35] Ayrıca büyük buldok yarasası başka bir yarasaya çarpmak üzereyse ultrasonik atışın sonuna kısa, güçlü ve pes bir uyarı sesi ekleyerek sonar çağrısını bir mesaja dönüştürebilir.[36]

† Donald Griffin *Listening in the Dark* adlı kitabının bir bölümünü "beceriksiz yarasalar"a ayırmıştı.[39] Bu bölümde, ince tellerden yapılmış bir perdeden uçarak geçmek gibi, yarasaların öve öve bitirilemeyen mucizevi becerilerinin sadece "en atik ve en uyanık" bireyler için geçerli olduğuna dikkat çekiyordu. Griffin, yarasalar bazı koşullarda "bir hayli sakardır ve başka zamanlarda hiç zorluk çekmeden savuşturdukları engellere bazen bodoslama dalarlar. Belki de bu konuda biraz alınganlaştım çünkü ne zaman bir yarasa bir şeye çarpacak olsa bu konuda çoğu zaman hafif suçlayıcı bir ses tonuyla bir şeyler söylendiğini duyuyorum" diye yazmıştı.

ra kâğıdını birbirinden ayırt edebilir ama mağaraya yeni takılmış bir kapıya bodoslama dalarlar.[40] Uçan böcekleri biçimlerinden tanıyabilir ama havaya fırlatılan bir çakıl taşının peşine düşerler. Yarasalar bu tür hataların önüne geçebilmeye muktedirdir. Sadece dikkat etmezler. Belleklerine ve içgüdülerine güvenirler. İnsanlar da aynı şekilde davranır: Çoğunlukla eve yakın yerlerde trafik kazası yaparız; bunun kısmen nedeni, sürücülerin bildikleri yollarda daha dikkatsiz davranmalarıdır. Her iki durumda da algı, duyu organlarından gelen bilginin yanı sıra, beynin o bilgiyle ne yapmaya karar verdiğinden de etkilenir. Beyinler ve işleyişleri hâlâ gizemlidir. Ekolokasyonla ilgili öğrendiğimiz her şeye rağmen Nagel hâlâ haklı: Yarasa olmanın neye benzediğini asla tam olarak bilemeyebiliriz. Ama bildiklerimize dayanarak bir tahminde bulunmaya cüret edersek ortaya şöyle bir tablo çıkabilir:

Hava kararmış ve bir büyük kahverengi yarasa olarak acıkmışsınız. Kolayca fark ettiğiniz ağaçların ve diğer büyük engellerin etrafında vızır vızır dolaşıyor; ara sıra dar bir ses aralığında güçlü çağrılar göndererek böcek arıyorsunuz. Bu çağrıların çoğu uzaklaşıp kayboluyor ama bir kısmı geri dönüp saat bir yönünde uçan bir şey olduğunu haber veriyor. Bir güve olabilir mi? Hedefi sonarınızın konisinde tutmak için önce başınızı, sonra gövdenizi çeviriyorsunuz. Artık hedefin uzaklığını kesinkes biliyorsunuz ama onu hâlâ bulanık algılıyorsunuz. Siz hedefe yaklaştıkça durum değişiyor. Çağrılarınız kısalıp hızlandıkça ve ses perdesi genişledikçe hedefe dair algınız da keskinleşiyor. Bu *gerçekten* de bir güve; hem de büyük bir güve ve sizden uzaklaşıyor. Böceğe saldırdığınız sırada boğazınızdaki olağanüstü kaslar olabilecek en hızlı sonar atışlarını göndererek güveye odaklanıyor. Kuyruğunuzu bir kürek gibi kullanarak avınızı ağzınıza yönlendirdiğiniz sırada güvenin başı, gövdesi ve kanatları zengin detaylara kavuşuyor. Ve tüm bunlar göz açıp kapayıncaya dek olup bitiyor.

Yarasaların bu denli başarılı olmaları şaşırtıcı değil. Bu hayvanlar Antarktika dışında her kıtada yaşar ve her beş memeli türünden biri yarasadır. Bazı yarasalar havadan böcek toplar, bazılarıysa ağaçlardan meyve. Bazı yarasalar kurbağa yakalar, bazıları kan içer, bazılarıysa vücutlarından iki kat uzun dilleriyle nektar yudumlar. Bazı yarasalar yarasa yer. Bazıları ekolokasyonla sudaki dalgalanmaları saptayarak

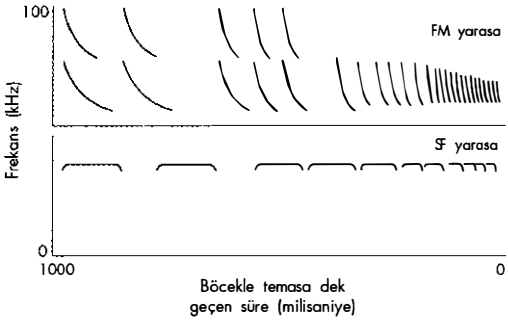
balık avlar. Bazı yarasalar sonar atışlarını yansıtacak şekilde uyarlanmış çanak biçimli yaprakları ekolokasyonla saptayarak bitkileri tozlaştırır. Bazılarıysa ekolokasyonun zorluklarını, daha önce gördüklerimizden temelde farklı bir şekilde çözerek dünyadaki en özel sonar biçimini geliştirmiştir.

Çoğu yarasa, arketipik büyük kahverengi yarasayla büyük ölçüde benzer şekilde ekolokasyon yapar. Nispeten uzun sessizliklerle ayrılmış, 1-20 milisaniye süren kısa sonar atışları gönderirler. Atışlar geniş bir frekans bandını süpürdüğünden bu hayvanlar FM (frekans modülasyonlu) yarasalar olarak da bilinir. Fakat nalburunlu yarasalar, yaprakburunlu Eski Dünya yarasaları ve Parnell'in bıyıklı yarasası dahil 160 civarında tür çok farklı bir şey yapar.[41] Çağrıları çok daha uzundur; bazı türlerde onlarca milisaniye sürer. Çağrılar arasındaki esler ise çok daha kısadır. Bu türler, bir frekans aralığını kapsamak yerine tek bir notaya tutunur. Bu nedenle onlara SF (sabit frekanslı) yarasalar denir ve bu yarasalar çok özel bir yankı çeşidine kulak verir.

Sonar atışı uçan bir böceğin kanadına çarptığında yankının şiddeti, kanat yukarı aşağı hareket ederken değişir. Fakat belli bir anda, böceğin kanadı gelen sese dik konumdayken, özellikle yüksek ve keskin bir yankı doğrudan yarasaya geri döner. Akustik parlama olarak adlandırılan bu yankı yakınlarda uçan bir böceğin foyasını meydana çıkarır. FM yarasalar teorik olarak bu parlamaları tespit edebilir ama pratikte bunu yapmaları pek mümkün olmaz. Kısa sonar atışlarının aralarındaki uzun sessizlikler nedeniyle bir FM yarasanın, böceğin kanadına, akustik parlama yaratacak doğru anda isabet ettirmesi için çok şanslı olması gerekir. SF yarasaların atışlarıysa tersine, kanat çırpma sürecinin bütününü kapsayacak kadar uzun sürer. O nedenle bol bol parlama yakalarlar. Yapraklar ve arkaplandaki diğer cisimler, kanatlar gibi ritmik hareket etmediğinden bir SF yarasa, parlamaları kullanarak, kanat çırpan bir böceği etrafındaki sık yapraklardan ayırt edebilir. Akustik parlamalar, ışık parlamalarının işitsel eşdeğeri olsa gerek.

1960'lardan beri SF yarasalar üzerinde çalışan Hans-Ulrich Schnitzler, bu yarasaların kanat çırpma ritmine göre farklı böcekleri tanıyabildiğini gösterdi.[42] SF yarasalar böceğin kendilerine yaklaşıp

yaklaşmadığını anlayabilirler. Canlı hedefleri cansız olanlardan kesinlikle ayırt edebilirler. Büyük kahverengi yarasaların tersine SF yarasalar havaya atılan çakıl taşlarının peşine düşmez.*



Bu spektrogramlar, bir böceğe yaklaşan iki yarasanın ekolokasyon çağrılarını gösteriyor. Dikkat ederseniz FM yarasanın çağrıları geniş bir frekans aralığını kapsarken, SF yarasanınkiler çoğunlukla aynı notada kalır. Ama her iki yarasa da avına yaklaşırken daha kısa ve hızlı çağrılar gönderir.

SF yarasaların çağrıları gibi kulakları da özelleşmiştir. Örneğin büyük nalburunlu yarasa, 83 kHz civarında sabit bir frekansla çağrı gönderir ve tam da bu perdeyi algılayan nöronlarının sayısı çok daha fazladır.[43†] Kendi yankılarına, başka hiçbir sese olmadığı kadar duyarlıdırlar. Diğer türlerin de kendilerine has imza frekansları vardır; sanki her SF yarasa, işitsel dünyadan, kendisine ait olduğunu iddia ettiği ince bir dilim kesmiş gibidir.[44] Ancak bu strateji önemli bir sorun –FM yarasaların karşılaşmadığı on birinci zorluğu– doğurur.

---

* Pratik hayatta birçok yarasa SF ve FM çağrıları karma kullanır. Büyük kahverengi yarasalar gibi FM yarasalar, açık havada av ararken SF benzeri atışlar yapar. SF yarasalarsa avlarıyla aralarındaki mesafeyi ölçerken atışlarının sonuna kısa bir frekans süpürmesi ekler.

† Araştırmacılar bu hassas bandı, görme keskinliğinin en fazla olduğu retina bölümünün adından yola çıkarak akustik fovea olarak adlandırmıştır. Bu, iyi bir benzetme olmakla birlikte çok doğru değildir. Fovea, fiziksel bir alanda görmenin en keskin olduğu bölgedir. Ancak akustik fovea, bir enformasyon alanında yarasanın en keskin işittiği bölgedir. Bu durum daha çok, yeşilin belirli bir tonuna çok daha iyi gören gözlerle bakmaya benzer.

Sesler, kaynağına yaklaştıkça tizleşiyormuş gibi gelir. Yaklaşan bir ambulansın sirenini düşünün. Buna Doppler etkisi diyoruz. Yani SF yarasa bir böceğe doğru uçarken duyduğu yankıların frekansı artar ve sonunda yarasanın en iyi işitme bölgesini aşar. Fakat Schnitzler'ın 1967'de keşfettiği gibi, SF yarasalar Doppler kaymalarını telafi edebilir.[45] Bir hedefe yaklaşırken, normal istirahat frekansından daha düşük frekanslı çağrılar gönderirler. Böylece frekansı yükselen yankılar kulaklarına tam da doğru perdede gelir. Dahası bunu basbayağı uçarken yaparlar; hedeften gelen yankıları ideal frekansın yüzde 0,2'si içinde tutacak şekilde çağrılarında durmadan ufak tefek değişiklikler yaparlar.[46] Bu, hayvanlar âleminde eşi benzeri olmayan, akıllara durgunluk veren bir motor kontrol becerisidir.

Çalmaya çalıştığınız notadan üç ton tiz ses çıkaran akortsuz bir piyanonuz olduğunu farz edin. Bu durumda do notasını çalmak isterseniz solundaki la tuşuna basmanız gerekir. Bir süre sonra buna alışırsınız ama şimdi de piyanonuzdaki hataların sistematik olmadığını ve bastığınız notalarla çalmak istediklerinizi arasındaki ses açıklığının sürekli değiştiğini farz edin. Artık bu berbat enstrümanla çaldığınız müziği dinlerken notalar arasındaki ses açıklıklarına sürekli dikkat etmeniz ve çalarken parmaklarınızı buna göre ayarlamanız gerekir. SF yarasalar böyledir ve bir saniye içinde bunu pek çok kere, hemen hemen hiç hatasız yaparlar. Hatta aynı anda birkaç farklı hedef için yapabilirler. Nalburunlu yarasa dikkatini farklı mesafelerdeki engellere yöneltebilir ve her biri için Doppler etkisini doğru biçimde telafi edebilir.[47*]

Bir gece böceğinin yarasalardan kaçabileceği güvenli bir ortam yoktur. Açık havada uçsalar büyük kahverengi yarasalara yakalanabilirler. Sık yeşilliğin arasına dalsalar büyük nalburunlu yarasalar peşlerine düşer. Bir yere konup hareketsiz dursalar yaygın büyük kulaklı yarasalar onları yine de bulabilir. Sonar, her habitata uyabilen, yenilmez bir silah

---

* Böylece SF yarasalar, olası Doppler etkisi sorununu kendi lehine çevirir. FM yarasalar, çağrıyla geri dönen yankının çakışmaması için çağrılarını kısa tutmak zorundadır. Ama SF yarasalar, çağrılarıyla yankıları zamandan çok frekansla ayırır. Doppler etkisi sayesinde yankılar genellikle çağrılardan daha tiz ve yarasanın ince ayarlı kulakları için daha barizdir. İşte bu nedenle çağrıları, akustik parlamanın geri dönmesine olanak tanıyacak ve kanat çırpan avın varlığını açığa vuracak kadar uzun olabilir.

gibi görünür. Ama kesinlikle çok yönlü olmasına rağmen alt edilmez değildir. Yarasalar inanılmaz bir duyu geliştirirken, kapılarını aynı derecede inanılmaz yanılsamalara açmışlardır.

Jesse Barber'ın laboratuvarında ince ince kar atıştırıyor ya da öyle görünüyor. Ekip, Zipper ile diğer yarasaların uçtuğu odaya güveleri taşırken böceklerin geride bıraktığı beyaz pullardan bir bulut havada asılı kaldı. Pullar etrafa öyle dağılıyor ki Barber ve Juliette Rubin'de fena halde alerji yapmış; o nedenle ikisi de artık maske takıyor. Bunun, lepidopteristler (kelebekleri ve güveleri araştıran kişiler) arasında sık görülen bir meslek hastalığı olduğunu söylüyorlar.

Pullar, biliminsanlarının havayollarında yangıya neden olmanın yanı sıra, yarasaların çağrılarını emip yankıları susturarak güveleri korur.[48] Bu akustik zırh, yarasalara karşı geliştirdikleri birkaç savunmadan sadece biridir.[49] Önceki bölümde gördüğümüz gibi, güve türlerinin yarısından fazlasında yarasa sonarını duyabilen kulaklar bulunur. Bu kulaklar önemli bir avantaj sağlar. Yarasalar, güveye çarpıp geri dönen seslere kulak verir ama güvenin aynı sesleri yalnızca kendisine ulaşana dek, yani ses çok daha güçlüyken saptaması gerekir. O nedenle yarasalar küçük güveleri en fazla 8 metre, buna karşılık güveler yarasaları 14-30 metre öteden duyabilir.[50] Birçoğu yarasanın sesini duyduğunda atlatma hamleleri ve dik dalışlar yaparak ya da daireler çizerek bu avantajdan sonuna kadar faydalanır. Bazılarıysa seslere yanıt verir.[51]

On bir bin tür içeren geniş bir grup olan kaplan güvelerinin karınlarının iki yanında davul benzeri bir çift organ bulunur. Bu organlar titreşerek yarasaların kafasını karıştıran ve güveleri ıskalamalarına neden olan ultrasonik tıkırtılar çıkarır.* Bu tıkırtılar bazen uyarı renklerinin akustik biçimi gibi rol oynar: Birçok kaplan güvesi, tadı berbat kimyasallarla doludur ve çıkardıkları tıkırtılar yarasalara, yenmeye değer olmadıkları mesajını verir.[53] Ayrıca tıkırtılar, yarasanın

* Bunu ilk olarak 1965'te gösteren Dorothy Dunning ve Kenneth Roeder, tıkırtıların, küçük kahverengi yarasaların avlanma başarısını engellediğini keşfettiler.[52] İkili, yarasalara, havaya fırlatılan un kurtlarını yakalamayı öğretti; yarasalar mükemmele yakın iş çıkarıyordu. Ama kaplan güvesi tıkırtılarının kaydı dinletildiğinde genellikle ıskalıyorlardı.

sonarında parazit yapabilir. Büyük kahverengi yarasaları, kor rengi muhteşem bir Amerikan kaplan güvesi olan *Bertholdia trigona* ile karşı karşıya getiren Aaron Corcoran ve Jesse Barber 2009'da buna dair kesin deliller buldular.[54] Bu güvelerin hiçbir kimyasal savunması yoktur ve yarasalar onları fırsatını bulduğunda yer. Fakat tıkırdayan bir *Bertholdia*'ya yaklaşan büyük kahverengi yarasalar, güve yerinden kıpırdamasa bile saldırıda başarısız olmuşlardı. Tıkırtılar yankılarla çakışarak yarasanın mesafe ölçme yetisini bozuyordu.[55] Yarasanın bakış açısıyla daha önce net biçimde tanımlanmış ve yeri tam olarak saptanmış bir hedef ansızın konumu belirsiz, hayal meyal bir buluta dönüşüyordu.*

Bazı güveler, işin içine büyülü sesler karışmadan da yanılsamalar yaratabilir. Barber ve Rubin ay güveleri yetiştiriyordu. Beyaz gövdesi, kan kırmızı bacakları, sarı antenleri ve bir çift uzun kuyrukla sonlanan limon yeşili kanatlarıyla kolayca ayırt edilen ay güveleri el ayası büyüklüğünde böceklerdir. Laboratuvardaki dolabı açınca, boş krizalitleri raflara saçılmış, kapakta sessiz sakin asılı duran birkaç ay güvesiyle karşılaşıyorum. Ergin ay güvesinin ağzı yoktur ve ömrü çok kısadır. Bir hafta içinde ölür. O zamana kadar "Tek yaptıkları çiftleşmek ve yarasaları savuşturmaktır," diyor Barber. Bu güveler tehlikeli kimyasallar içermez. Yarasa sonarında parazit yapan tıkırtılar da çıkaramazlar. Hatta kulakları olmadığından yarasaların geldiğini bile duyamazlar. Ama uçarken arka kanatlarının uzantısı olan uzun kuyrukların dönerek dalgalanması ekolokasyon yapan yarasaların dikkatini dağıtan yankılar oluşturur; bunun sonucunda yarasa, güve için elzem olmayan bir

* Yaklaşık 1500 türü kapsayan bir başka büyük grup olan atmaca güvelerinin de yarıya yakını yarasaların sonarlarında parazit yapabilir. Ancak kaplan güvelerinden farklı olarak atmaca güveleri kafa karıştırıcı tıkırtıları cinsel organlarını birbirine sürterek çıkarır.[56] Görünüşe göre evrim sürecinde bu yetenek birbirinden bağımsız olarak üç kez gelişmiş ve gruplardan her biri, cinsel organlarının farklı bir bölümüne yarasa sersemletici alet olarak yeni bir amaç kazandırmıştır. Buna karşılık yarasalar da güve savunmalarına karşı önlemler geliştirdi. En az iki tür –Avrupa'da yaşayan basık burunlu yarasa ve Kuzey Amerika'da yaşayan Townsend'ın büyük kulaklı yarasası– güvelere gizlice yaklaşmalarını sağlayan çok sessiz çağrılar gönderir. Bu sinsi fısıltılar sayesinde avlarına o kadar yaklaşırlar ki güve kaçacak ya da sonar yayınını bozacak zaman bulamaz.[57]

yere saldırır. Kanat kuyruğu olmayan bir ay güvesinin yarasaya yem olma ihtimali ortalama dokuz kat fazladır.[58] "Bunu keşfettiğimde, gerçek olamayacağını düşündüm," diyor Barber. "Ekolokasyon böylesine fevkalade bir duyu. Dönüp duran bir zar parçası nasıl olur da yarasaları kandırabilir? Ama öyle olduğunu görüyoruz, hem de tutarlı biçimde."

Bunu Barber'ın ekranında ben de görüyorum. Bir ay kelebeği odada serbest bırakılınca Zipper saldırıya geçiyor ama ıskalıyor. Dönüp tekrar saldırıyor, güvenin kanat kuyruğunun bir parçasını koparıp tükürüyor. İştah kaçıran parça yere düşerken Barber bana bakıp sırıtarak, "Söylemiştim," diyor. Bakıcılar güveyi dışarı çıkarıyorlar. Güve sol kanat kuyruğunu kaybetmenin dışında zarar görmedi. Bu kez kanatları zaten kesilmiş başka bir ay kelebeği getiriyorlar. Zipper bu kez güveyi anında yakalıyor.*

Ay güvelerine ilk baktığımda, kuyruklarının tavus kuşu kuyruğuna benzediğini düşünmüştüm. Ama görsel önyargılarım beni bir kez daha yanıltmıştı. Bu güveler eş bulurken koku duyusunu kullanır; kanat kuyruklarının onları daha çekici kıldığına dair bir delil yok. Bu kuyrukların gayesi, müstakbel eşlerin gözlerine hoş görünmek değil, müstakbel avcıların kulaklarını şaşırtmaktır.

Donald Griffin yarasa ekolokasyonunu, şaşırtıcı sürprizlerin sonsuz kaynağı olan "sihirli bir kuyu" olarak tarif etmişti.[60] Neler yapabildiklerini anlarsak yarasaları kötü şöhretli hayvanlar yerine biyolojik mucizeler olarak düşünebiliriz. Avladıkları hayvanları daha iyi anlayabiliriz. Dahası, Griffin'in çalışmalarının ardından birçok biliminsanının yaptığı gibi, dünyayı yankılar yoluyla algılayan diğer canlıları bulmaya çalışabiliriz.

İki memeli grubu birbirinden ne kadar farklı olabilirse yarasalarla yunuslar da birbirinden o kadar farklıdır. Yarasaların ön üyeleri

* Kuyrukların nasıl işe yaradığı hâlâ tam olarak bilinmiyor. Ürettikleri yankılar güvenin vücudundan gelen yankılarla kaynaşarak yarasanın, gerçekte olduğundan çok daha büyük bir hayvanı avlamamaya çalıştığını sanmasına neden oluyor olabilir. Ya da belki yankılar kuyrukların apayrı veya daha bariz hedefler olduğu algısını yaratıyordur. Sebebi ne olursa olsun yöntem işe yarar. Güvelerde uzun kuyruklar, birbirinden bağımsız olarak en az dört kez evrilmiştir ve bu kuyruklardan bazılarının uzunluğu, kanadın kalan kısmının iki katı kadar olabilir.[59]

esneyip kanatlara, yunuslarınkilerse yassılaşıp yüzgeçlere dönüşmüştür. Yarasaların vücudu zarif ve hafiftir; yunuslarınsa suda hareket ederken asgari dirençle karşılaşmaya elverişli, yağlı bir yapısı vardır. Yarasalar açık havada, yunuslar açık denizlerde yol alır. Ama her iki grup da üç boyutlu ve genellikle karanlık yerlerde dolaşmak ve besin aramak zorundadır. Her iki grup da bunu ekolokasyon sayesinde yapmaya başladı.[61] Ve her iki grup da bilime sırrını üç aşağı beş yukarı aynı şekilde açtı: İlk dikkati çeken şey, yunusların karanlıkta, hatta gözleri bağlıyken bile önlerine çıkan engellere çarpmamaları oldu; araştırmacılar daha sonra onların ultrasonik klikler çıkardığını ve bu sesleri duyduğunu fark ettiler.* Griffin ve diğerlerinin öncü çalışmaları sayesinde ekolokasyonun var olduğu zaten bilindiği için bu gözlemleri yorumlamak nispeten kolay oldu. Yunuslarla çalışan araştırmacılar, toplasanız yirmi yıl önce inanılmazmış gibi görünen bir beceriyi sınayabildiler.

Bu avantaja rağmen, yunuslarla çalışmak kolay olmadığından yunus sonarıyla ilgili araştırmalar oldukça yavaş ilerledi. Yunusların boyutları başlı başına bir sorundur. En küçük yunus, en büyük yarasadan 40 kat ağırdır ve küçük bir oda yerine büyük bir tuzlu su tankı gerektirir. Ayrıca yunuslar daha zeki, eğitilmesi daha zor ve bildiğini okuyan hayvanlardır. İlk deneylerden birine katılan Kathy adlı afalina göz koruması takmayı kabul etmiş ama çenesini ve alnını örten, ses kesici bir maske takmayı kesinlikle reddetmişti. Ayrıca yarasaları binalarda ve ormanlarda kolayca bulabilirsiniz; oysa yunuslar, çoğu insanın yalnızca yüzeyinde gezindiği erişilmez bir habitatta yaşar. O nedenle yunuslar üzerinde çalışan araştırmacılar çoğunlukla akvaryumlarda ya da askerî tesislerde yaşayan hayvanlarla çalışmak zorundaydılar.[64]

---

* 1950'lerde, Arthur McBride yunusların, musurgillerin [*porpoises*] ve dişli balinaların aynı yetiye sahip olup olmadığını merak etti. Karanlıkta balık ağlarından kaçan musurgiller ona yarasaları anımsatmıştı.[62] Ken Norris 1959'da yaptığı aydınlatıcı bir deneyde, Kathy adlı afalinayı, gözlerini lastik vantuzlarla kapatacak şekilde eğitti.[63] Kathy sudaki balık parçalarını hızlı klikler göndererek görmeden de bulabiliyor, tel perdeler arasında uçabilen yarasalar gibi dikey borulardan yapılmış bir labirentte yüzebiliyordu. Hatta yarasalardan daha çevikti. Griffin'in yarasaları kanat ucuyla tellere değiyordu ama Kathy iki aylık test sürecinde sadece bir kez bir boruya çarptı ve o zaman bile bunu kasten yapmış gibi görünüyordu.

1960'larda ABD Donanması, kayıp dalgıçları kurtarmak, batık teçhizatı bulmak ve mayınları saptamak üzere yunusları eğitmeye başladı. 1970'lerde Donanma, yunusların dünyayı nasıl algıladığını anlamak için değil de bu hayvanların üstün yeteneklerini tersine mühendislikte kullanarak askeri sonarı daha da geliştirmek amacıyla ekolokasyon araştırmalarına büyük yatırım yaptı. Hawaii'de, Kāne'ohe Koyu'ndaki bir araştırma istasyonu, psikolog Paul Nachtigall ve elektrik mühendisi Whitlow Au'nun önderliğinde önemli araştırmaların yapıldığı bir merkez haline geldi.[65] "Yunus kara kutuydu ve benim ilgimi çeken de o kutunun parametrelerini tanımlamaktı," diyor Au. "Çocuklarımı çok üzüyordum çünkü hayvanlara sarılmak istiyorlardı, bense onların sadece denek olduğunu söylüyordum." (Au'ya yunuslarla onca yıl çalıştıktan sonra düşüncesinin değişip değişmediğini soruyorum. Bir anlık duraksamanın ardından, "Artık onların daha karmaşık denekler olduğunu düşünüyorum," diyor.)

Au ve meslektaşları, Heptuna, Sven, Ehiku, ve Ekahi gibi afalinaların açık sulardaki büyük, çevrili alanlarda yüzebildiği Kāne'ohe Koyu'nda, yunus sonarının tahmin ettiklerinden de etkileyici olduğunu anlamışlardı.[66] Yunuslar şekline, boyutlarına ve yapıldığı malzemeye göre farklı cisimleri ayırt edebiliyor; su, alkol ya da gliserinle dolu silindirleri birbirinden ayırabiliyorlardı. Tek bir sonar atışıyla elde ettikleri bilgiye dayanarak uzaktaki hedefleri tanımlayabiliyorlardı. Çökeltinin birkaç metre altında gömülü cisimleri rahatlıkla bulabiliyor, bunların pirinçten mi yoksa çelikten mi yapıldığını anlayabiliyorlardı.[67] Hiçbir teknolojik sonar henüz bu düzeye ulaşamadı. Bugüne dek "Donanma'nın limanlardaki mayınları tespit etmek için kullanabildiği tek sonar, yunustur," diyor Au.

Yunuslar, dişli balinalar grubunda yer alır.* Bu grubun diğer üyeleri –musurgiller, beyaz balinalar (beluga), deniz gergedanları (narval),

* Terminolojiyle ilgili kısa bir not: Yunuslar, balinalar ve tüm akrabaları, setase grubuna dahildir (setase terimi yerine günlük konuşma dilinde balinalar diyoruz). Balinalar iki ana gruba ayrılır: dişsiz balinalar [*Mysticeti*] ve dişli balinalar [*Odontoceti*]. Yunuslar dişli balinalar içinde bir gruptur; katil balinalar ile pilot balinalar da bu grupta yer alır. Yunuslar ve musurgiller iki farklı dişli balina grubudur ama bu iki terim daha önceleri bazen birbiri yerine kullanılıyordu; ekolokasyonla ilgili ilk makalelerin bir kısmında "şişe burunlu musurgiller"den bahsedilir. Özetlemek gerekirse yunuslar balinadır, katil balinalar yunustur, musurgiller yunus değildir.

ispermeçet balinaları (kaşalot) ve orkalar (katil balina)– de ekolokasyon yapar ve birçoğu bu konuda, daha aşina olduğumuz afalinalar kadar iyidirler. Nachtigall'ın ekibi 1987'de, beş buçuk metre boyunda bir yalancı katil balinayla (zeki ve sosyal olmasıyla tanınan, siyah renkli bir yunus türü) çalışmaya başladı. Kina adlı bu hayvan, insan gözüne birbirinin aynı görünen ve kalınlıkları sadece saç teli kadar farklı olan içi boş metal silindirleri sonarını kullanarak birbirinden ayırt edebiliyordu.[68] Bir keresinde unutulmaz bir olay yaşandı. Ekip Kina'yı, aynı şartnameye göre üretilmiş iki silindiri kullanarak sınadı. Kina iki cismin farklı olduğunda ısrar ederek herkesin kafasını karıştırdı. Ekip tekrar ölçüm yapınca, silindirlerden birinin bir ucunun diğer ucundan 0,6 milimetrelik cüzi bir farkla daha geniş olduğu anlaşıldı. "İnanılmazdı," diyor Nachtigall. "Birbirinin aynı iki silindir sipariş vermiştik, ustalar ikisinin de aynı olduğunu söylemişti ve hayvan, 'Hayır, bunlar farklı,' dedi. Haklıydı da."

Yunuslar saklı bir cismi ekolokasyonla tespit ettikten sonra aynı cismi görsel olarak –televizyon ekranında bile– tanıyabilirler.[69] Bu bariz bir beceri gibi görünebilir ama bir an durup neler içerdiğini düşünün. Hayvan cismin konumunu saptamakla kalmayıp diğer duyulara tercüme edilebilen zihinsel bir temsilini oluşturur. Ve bunu, doğalında ayrıntılı üç boyutlu bilgi taşımayan bir uyaran olan *ses*le yapar. Bir saksafon duyduğunuzda enstrümanı sesinden tanıyabilir, müziğin nereden geldiğini anlayabilirsiniz belki ama sadece sesinden enstrümanın şeklini tahmin etmeye çalışıyorsanız size bol şans dilerim. Ne var ki *dokunarak* bir saksafonun neye benzediğine dair sağlam bir izlenim edinirsiniz. Ekolokasyonda da böyledir. Bu duyu genellikle "sesle görme" olarak tarif edilir ama onu rahatlıkla "sesle dokunma" olarak da düşünebilirsiniz. Yunus ekolokasyon yaparken âdeta hayalî elleriyle uzanıp etrafını yoklar.

Sesi böyle düşünmeye alışkın değilim. Dışarıda havlayan köpekleri, ötüşen sığırcıkları, cırıldayan ağustosböceklerini penceremden duyabiliyorum; hepsi de dinleyicilerine sesle bilgi iletmeye çalışıyor. Ama bu gezegenin havası ve suyu aynı zamanda, hayvanların *kendi kendilerine* bilgi iletmek için kullandıkları, iletişim için değil, keşfetmek için ürettikleri seslerle doludur. Diğer duyular da keşfetmek için *kullanılabilir*, ancak ekolokasyon, doğası gereği keşif amaçlıdır. Hele hele yunus gibi meraklı bir hayvan tarafından kullanıldığında kesinlikle böyle

olduğunu hissettirir. 1990'larda Oahu'da yunuslarla çalışmaya başlayan Brian Branstetter, "Hayvanlar devamlı ekolokasyon yapmaz ama ne zaman önlerine yeni bir cisim koysanız vızıldayarak içini dışına çıkarırlar," diyor. "Onlarla yüzerken kliklerini duyabiliyor, hissedebiliyor ve şunu düşünüyorum: Bu hayvan tam şu anda beni süzüyor!"

Yunus sonarıyla ilgili –nasıl üretildiği dahil– çoğu şey beklenmediktir. Yunusun tepesindeki nefes deliği burun deliklerinizin eşdeğeridir.[70] Nefes deliğinin hemen altında, hayvanın burun boşluğunda fonik dudaklar olarak adlandırılan bir çift organ bulunur. Yunus havayı buradan itip dudakları titreştirerek klik sesleri çıkarır. Ses öne doğru ilerler ve melon adı verilen, yunusun çıkıntılı alın yapısını oluşturan yağlı bir organda toplanır. Yani bir yarasanın çağrısı boğazından başlayıp ağzından ya da burnundan çıkarken, bir yunusun klik sesi burnundan başlar ve alnından geçip dışarı çıkar.

Dişli balinaların en büyüğü ispermeçet daha da garip bir şey yapar.[71] Hayvanın devasa burnu, 16 metrelik gövdesinin üçte biri uzunluğunda olabilir ve fonik dudakları en önde bulunur. Bu dudaklar titreştiğinde sesin büyük bölümü balinanın başında *geriye* doğru gider. Bir zamanlar balina avcılarının çok kıymet verdiği yağla dolu ispermeçet organından geçer, başın arkasındaki bir hava kesesine çarpıp yansır ve ilerleyerek balinacıların değersiz bulup *junk* yani ispermeçet organı olarak adlandırdığı başka bir yağlı organdan geçer. Abes görünen bu dolambaçlı yolun sonunda ortaya çıkan ses, hayvanlar âlemindeki en yüksek sestir. 236 desibel şiddetindeki bu ses temelde bir patlamadır.[72] Biliminsanları ispermeçet balinalarının kliklerini kaydetmek için kullanacakları hidrofonları kalibre etmek istediklerinde, suya *cherry bomb* denen patlangaçlardan atarlar. Klik sesleri, yaklaşık 4 derece genişliğinde son derece ince bir ışın halinde odaklanır. Afalinanın okyanusu algılarken kullandığı sonarını bir fenere benzetirsek, ispermeçet balinasınınki bir lazere benzer.*

* İspermeçet balinalarının çağrıları niye abes kaçacak kadar yüksek seslidir? Avın peşinden dibe daldıklarında okyanus zeminini bu şekilde tespit ediyor olabilirler. Saatte 9 mile çıkan hızları ve 40 tonu bulabilen vücutlarıyla durmaları biraz zaman alır. Bir diğer nedense temelde kalamarla beslenmeleri ve kalamarın yumuşak vücudunun sonarla zor saptanması olabilir.

Ayrıca dişli balinalar kendi yankılarının yolunu kesmek için tuhaf bir yöntem kullanır.[73] Ken Norris 1960'larda Meksika sahilinde bir yunus iskeleti bulmuştu; iskeletin alt çenesi yarı saydam denebilecek kadar inceydi. Bu uzun kemiğin içindeki boşluk melonu oluşturan yağların aynısıyla doludur. Yunus ne kadar aç olursa olsun bu "akustik yağlar" asla enerji için yakılmaz. Bu yağların amacı, sesi iç kulağa yönlendirmektir. Yunus burnuyla klik sesleri çıkarıp çenesiyle dinleyerek ekolokasyon yapar.

Bu tuhaf özelliklere rağmen dişli balinalar, yarasalarla aynı ekolokasyon hilelerine başvurur. Daha fazla bilgi gerektiğinde klikleri hızlandırabilir (yarasaların son vızıltısında olduğu gibi) ya da bu klikleri gruplar halinde gönderebilirler (sonar atış gruplarında olduğu gibi).[74] Kulaklarının duyarlılığını, kendi gürültülerini azaltacak ve geri dönen yankıları aynı sabit şiddette algılayacak şekilde ayarlayabilirler.[75] Fakat dişli balinalar sonarlarıyla hiçbir yarasanın yapamadığı şeyleri de yapabilir. Ses suda, havadakinden farklı davranır. Daha hızlı ve daha uzağa gider. O nedenle yunus sonarı, hiçbir yarasanın erişemeyeceği menzillerde iş görür.* İlk deneylerden birinde Au, gözü bağlı yunusların, 100 metre uzaklıktaki çelik küreleri tespit edebildiğini gösterdi.[76] Ekip bu mesafedeki hedeflerin konumunu kontrol etmek için dürbün kullanmak zorunda kalmıştı. Ama yunusların dürbüne ihtiyacı yoktu; üstelik daha sonra, bunu ne kadar zor koşullar altında yaptıkları anlaşıldı. O dönemde Kāne'ohe Koyu'nun, büyük kıskaçlarıyla suda kakofonik patlamalar yaratan karideslerle dolu olduğu bilinmiyordu. Yunuslar âdeta bir sualtı rock konserinde, bir futbol sahasındaki tenis toplarını sesle tespit ediyorlardı. Daha sonra yapılan çalışmalar, ekolokasyon yapan yunusların hedeflerini 685 metre uzaktan saptayabildiğini gösterdi.[77]

Ayrıca ses, suyun altındaki cisimlerle farklı biçimlerde etkileşir.[78] Ses dalgaları, yoğunluk değişimiyle karşılaştığında genellikle yansımaya uğrar. Havada yayılırken katı yüzeylere çapınca geri seker ama suda, yoğunluğu çoğu zaman suyunkiyle benzer olan kaslara nüfuz eder, kemik ya da hava keseleri gibi iç organlara çarpıp yansır. Yarasa,

* Bunda yunus sonarı atışlarının daha kısa, daha yüksek sesli ve odaklanmış olmasının da katkısı vardır. Bir afalinanın çıkardığı klik sesleri, büyük kahverengi yarasanın çağrısına göre 40 bin kat fazla enerji içerebilir.

hedefinin yalnızca şeklini ve dokusunu algıladığı halde yunus, hedefinin *içine* bakabilir. Bir yunus sizi ekolokasyonla incelerken akciğerlerinizi ve iskeletinizi algılar.[79] Bir savaş gazisinin vücudundaki şarapnel parçasını, hamile bir kadının rahmindeki fetüsü muhtemelen hisseder. En önemli avı olan balıkların sudaki batmazlığını kontrol eden, hava dolu yüzme keselerini ayırt edebilir.[80*] Hava keselerinin şekline göre farklı balık türlerini neredeyse şaşmaz bir isabetle birbirinden ayırabilir. Dahası, bir balığın içinde metal kanca gibi tuhaf bir şey olup olmadığını anlayabilir. Hawaii'de, yalancı katil balinalar orkinosları oltanın ucundan çekip alır ve "kancanın balığın neresinde olduğunu bilirler," diyor, bu hayvanlar üzerinde çalışan Aude Pacinii. "Elimizde bir röntgen ya da MRI cihazı olmadığı sürece katiyen aklımıza gelmeyecek şeyleri 'görebilirler.'"

Bu nüfuz edici algı o kadar alışılmadıktır ki biliminsanları bunun sonuçları üzerinde yeni yeni düşünmeye başladılar. Örneğin dişli balinalar grubunda yer alan gagalı balinalar, dışarıdan bakıldığında yunusa benzer ama içeriden incelendiğinde kafatasları, genellikle erkeklerde bulunan ve tuhaf bir çeşitlilik gösteren ibikler, çıkıntılar ve tümsekler içerir. Pavel Gol'din bu yapıların, dişileri cezbetmek için gösterişli süsler olarak kullanılan geyik boynuzlarının [*antler*] eşdeğeri olabileceğini ileri sürdü.[82] Normal koşullarda bu süslerin görülebilir ve bariz biçimde vücudun dışına uzanması beklenir ama canlı tıbbi tarama cihazları gibi davranan hayvanlarda böyle olması gerekmez. Gagalı balinalar, şık siluetlerini hiç bozmadan "iç boynuzlar"ıyla dişilere yeterince reklam yapabilir.

Gagalı balinalar münzevi yaşayan hayvanlar olduğundan bu fikri sınamak zordur. Bugüne dek hiç esaret altında tutulmamışlardır ve tek bir nefesle dalıp saatlerce suyun altında kalabildiklerinden, birçok gagalı balina türü nadiren görülür. Buna rağmen hiç beklenmedik bir şekilde, dişli balinaların sonar sisteminin en büyük gizemlerinden birinin, doğal ortamlarında sonarı nasıl kullandıklarının aydınlatılmasına

* Balıkların çoğu, çok yüksek frekansları duyamaz ama bunun istisnaları vardır. Tıpkı bazı güvelerin yarasa çığlıklarını duyabildiği gibi, Amerikan tirsisi [*American shad*], körfez menhaden balığı [*Gulf menhaden*] gibi birkaç türde de yunus sonarını duyabilen kulaklar gelişmiştir.[81]

yardım etmişlerdir.[83] Çelik kürelerle aralarındaki mesafe ya da pirinçten yapılmış silindirlerin genişliği onlar için elbette önemli değildir. Peki ama onlar için önemli *olan* nedir? Yön bulmak, avlanmak ya da sorunları çözmek için sonarlarını nasıl kullanırlar? Dibe dalan ispermeçet balinaları, okyanus tabanında kayalara çarpmamak için gerçekten de ekolokasyon yapar mı? Beyaz balinalar ve deniz gergedanları Kuzey Kutbu'ndaki buz tabakasını tarayarak uzaktaki soluk alma deliklerini bulabilir mi? Yunuslar, bir sardalye sürüsüne daldığında, algıları tek bir balığa mı yoksa hepsine mi odaklanır? Aralarında, böceklerin kanat çırpmasını tespit eden SF yarasalarınkine benzer özel stratejiler geliştirenler var mıdır?

Yanıtları bulmanın bir yolu, akustik etiket (vantuzlu sualtı mikrofonu) kullanmaktır.[84] Bir dişli balina nefes almak için yüzeye çıkınca, küçük bir teknedeki biliminsanları, ellerinde uzun bir çubukla dikkat çekmeden eğilip akustik etiketi hayvanın böğrüne yapıştırır. Balina suya dalıp gözden kaybolduğunda cihaz hem klik seslerini hem de geri dönen yankıları kaydeder. Hayvanın suyun altındayken duyduğu ve duymaya *çalıştığı* her sesin günbegün detaylı kaydını tutar. Bir araştırma ekibi 2003'ten beri, Kanarya Adaları civarındaki Blainville gagalı balinalarına (sık dişli gagalı balina) akustik etiketler takıyor.[85] Bu hayvanlar dalışın başlangıcında, belki de orkalar gibi etrafa kulak kabartan yırtıcıların dikkatini çekmekten kaçındıkları için sessizdir. 400 metreye iner inmez klik sesi çıkarmaya başlar ve çoğunlukla dakikalar içinde yiyecek bulurlar. Bu karanlık ve derin sular balıklar, kabuklular ve kalamar bakımından öyle zengindir ki Blainville gagalı balinası seçici davranmayı göze alabilir. Binlerce yaratığı sese boğsa da Au ve Nachtigall'ın esaret altındaki hayvanlarda gördüğü ince ayrım becerilerini kullanarak en iyi lokmaları seçmek için sadece birkaç düzinesini kovalayabilir. Balinaların kullandığı bu yöntem o kadar verimlidir ki koca gövdelerini besleyebilmek için günde sadece dört saat kadar yiyecek aramaları yeterli olur.

Blainville gagalı balinalarının yiyecek arama şeklini mümkün kılan, sualtı sonarının bu denli uzun menzilli olmasıdır. Uçan bir yarasanın, sonar alanına giren böcek boyutlarında bir hedefle ne yapacağına karar vermek için bir saniyeden az zamanı vardır ama yüzen bir dişli balinada bu süre yaklaşık 10 saniyedir. Yarasa her an tepki vermek zorundadır.

Balinaysa *plan yapabilir*. Kitabın giriş bölümünde, hayvanlar sudan karaya çıkarken görme menzilinin artması sayesinde daha karmaşık zihinlerin evrilebildiğini söyleyen Malcolm MacIver'ın varsayımından söz etmiştim. Acaba aynı varsayım ekolokasyon için de tersinden işlemiş olabilir mi?

Sualtı sonarı, dişli balinalara planlayarak hareket etme şansı vermekle kalmayıp eşgüdümlü davranmalarına da olanak tanıdı. Küçük ve akrobatik bir tür olan dönücü yunuslar [*spinner dolphins*] geceleri, sayıları yirmi sekizi bulan ekipler halinde birlikte çalışarak avlanır. Kelly Benoit-Bird ve Whitlow Au, avlanmanın birkaç ayrı aşamadan geçtiğini gösterdi.[86] Dönücü yunuslar önce geniş aralıklı bir hatta devriye gezer. Bir grup balık ya da kalamar bulduklarında safları sıklaştırıp grubun üzerine giderler. Kurbanlar birbirleri üzerine yığılırken yunuslar avlarını ablukaya alarak kaçış yollarını kapatır. Ardından karşıt uçlardan sırayla çifter çifter çemberin ortasına dalarak kapana kısılan hayvanları yakalarlar. Bu sırada dönücü yunuslar eşzamanlı hareket ederek ablukanın düzenini sorunsuzca değiştirir ve özellikle o geçiş anlarında klik sesleri çıkarır. O esnada birbirlerine bağırarak komut mu verirler? Yoksa ekip arkadaşlarının konumlarını ekolokasyonla mı takip ederler? Kendi algı sınırlarını genişletmek için birbirlerinin yankılarından faydalanıyor olabilirler mi? Öyle ya da böyle, tek bir yunusunkine göre daha uzun menzilli bir duyu oluşturan sonarları, onların bu eşgüdümlü ve zekice davranışını mümkün kılar. Sürü suda 40 metre çapında bir alana yayılmış olsa bile sesle birbirine bağlı olduğundan yekvücut hareket edebilir.

Daniel Kish onları kıskandığını söylüyor. "Suda sonar kullanmak bir nevi hile yapmaktır," diyor. "Öyle bir ortam size inanılmaz bir üstünlük sağlar. Hava sonar için iletken bir ortam olmadığı halde yine de işe yarar." Ondan iyi kim bilebilir? Kish ne yarasa araştırmacısı ne de yunus araştırmacısı. Hayvanlarda ekolokasyon üzerine çalışmıyor.

Bizzat ekolokasyon yapıyor.

Dilimi şaklatmaya çalıştığımda, göle atılmış bir taş gibi boğuk, ıslak bir ses çıkıyor. Aynı şeyi Daniel Kish yaptığında çıkan ses daha keskin,

canlı ve *çok daha* yüksek.[87] Parmaklarını şaklatan birinin çıkardığı sese benzeyen, anında dikkat çeken bir ses bu. Kish'in neredeyse hayatı boyunca kullandığı bir ses.

1966'da saldırgan bir göz kanseriyle dünyaya gelen Kish'in sağ gözü 7, sol gözüyse 13 aylıkken alınmıştı. İkinci gözünü kaybettikten kısa bir süre sonra dilini şaklatmaya başladı. İki yaşındayken karyolasından inip evde keşif gezisine çıkmayı alışkanlık haline getirdi. Bir gece yatak odasının penceresinden tırmandı, bir çiçek tarhının içine düştü ve dilini şaklatarak arka bahçede tıpış tıpış yürümeye başladı. Akustik açıdan saydam tel örgüyü ve diğer taraftaki büyük evi algıladığını hatırlıyor. O tel örgüye ve benzerlerine tırmandığını, sonunda komşunun çağırdığı polisin gelip onu evine götürdüğünü hatırlıyor. Kish ekolokasyonun ne olduğunu ya da neredeyse yürümeye başladığından beri ekolokasyon yaptığını çok sonradan öğrendi.

Şimdi 50'lerinde olan Kish hâlâ dilini şaklatıyor ve geri dönen yankılarla dünyayı algılıyor.[88] Onunla Kaliforniya Long Beach'te, tek başına yaşadığı evinde buluşuyoruz. Evin içinde neyin nerede olduğunu gayet iyi bildiğinden ekolokasyon yapması gerekmiyor. Ama yürüyüş yapmak için dışarı çıktığımızda şaklamalar devreye giriyor. Kish çevik ve kendinden emin adımlarla yürüyor; zemindeki engelleri algılamak için uzun bir baston kullandığı halde diğer her şeyi ekolokasyonla algılıyor. Konutların bulunduğu bir cadde boyunca yürürken yanından geçtiğimiz her şeyi doğru tasvir ediyor. Her evin nerede başlayıp nerede bittiğini söyleyebiliyor. Verandaların ve çalıların yerini saptayabiliyor. Yol boyunca arabaların nereye park edilmiş olduğunu biliyor. Bir ağacın kaldırıma doğru uzanan dalına çarpmasın diye elimde olmadan Kish'i uyarmak istiyorum ama aslında buna gerek yok. Dalı rahatlıkla savuşturuyor. "Ekolokasyon yapıyor olmasaydım kesinlikle çarpardım," diyor.

Yarasaların ve dişli balinaların yanı sıra birçok hayvan ekolokasyonun daha basit biçimlerini kullanır. Sivri fare türleri, Karayipler'deki sivri fareye benzeyen solenodonlar ve Madagaskar'daki kirpiye benzeyen tenrekler gibi küçük memeliler yol bulmak için ultrasonik sesler çıkarır.[89] Sözümona ekolokasyon yapmayan bazı meyve yarasaları kanatlarıyla ses çıkarıp bu sesleri farklı dokuları ayırt etmek için kullanır.[90]

Meyve yiyen büyük bir Güney Amerika kuşu olan yağkuşu, belki de tünediği mağaralarda yönünü bulmak için işitilebilir sesler çıkarır.[91] Böcekçil küçük kuşlar olan yelyutanlar da aynı nedenle bu sesleri çıkarıyor olabilir.[92] Kish'in ve onun gibi birçok kişinin gösterdiği gibi insanlar da yankılardan faydalanarak yönlerini bulabilir.*

İnsan ekolokasyonu, yarasa ya da yunustaki kadar teferruatlı değildir ama Kish'in de dikkat çektiği gibi, bu türler ekolokasyon yapmaya milyonlarca yıl önce başladı. Ayrıca Kish'in, yarasa Zipper ve yalancı katil balina Kina'nın sahip olmadığı dil kullanma becerisi var.[93] Deneyimini söze dökebiliyor. Bunun, Nagel'ın felsefi ikilemini çözdüğünü söyleyebiliriz: Bir yarasa olmanın neye benzediğini asla bilemeyebiliriz ama Kish, Kish olmanın neye benzediğini açıklayabilir. Ancak görmenin neye benzediğine dair hiçbir anısı olmadığı halde Kish, görsel olmayan deneyimlerini çoğu zaman görsellik ifade eden terimlerle tarif ediyor. Keskin yankılar üreten pencereler ve taş duvarlar "parlak"tır. Daha kaba yankılar üreten bitki örtüsü ve pürüzlü taşlarsa "karanlık." Kish dilini şaklatırken, karanlıkta peş peşe kibrit yakıyormuşçasına, her biri etrafındaki alanı kısa süreliğine aydınlatan bir dizi "ışık parlaması" yaşıyor. "Gözleri gören yedi buçuk milyar kişinin yaşadığı bir gezegendeyim. İster istemez insanların deneyimlerini dile getirme biçimini özümsüyorsunuz," diyor. O, görmenin neye benzediğini bilmediği, bense sonar deneyimini tam anlamıyla kavrayamadığım için aramızda kelimelerin bile aşamadığı bir engel var. İkimiz de yaşamadığımız deneyimleri tarif etmek için ortak bir kelime dağarcığı kullanarak birbirimizin Umwelt'ini tahmin ediyoruz.

---

* Griffin baykuşların ekolokasyon yapıyor olabileceğini düşünüyordu ama yapmazlar. Yunuslarda ekolokasyon keşfedildikten sonra fokların da aynı beceriye sahip olabileceği düşünülmüştü ama böyle bir beceriye sahip değildirler. Foklar niye ekolokasyon yapmaz?[94] Bir nedeni hem karada hem de suda yaşamaları olabilir. Yunuslar bütünüyle suya bağımlıdır ama foklar ve denizaslanları karaya çıkmak zorundadır ve hem karada hem de suda çalışan bir sonar sistemi geliştirmek çok zordur. Bu hayvanlar sonar yerine gözlerine, kulaklarına ve Altıncı Bölüm'de gördüğümüz, dümen suyuna (kuyruk türbülansı) karşı inanılmaz hassas bıyıklarına güvenir. Ekolokasyon yaptığı bilinen bütün türlerin sıcakkanlı olması ve sayısız omurgasız türü içinde bildiğimiz kadarıyla hiçbirinde bu yeteneğin olmaması dikkat çekicidir. Bunun belli bir sebebi var mı yoksa sadece biliminsanları yeterince araştırmadığı için mi öyle olduğunu düşünüyoruz?

Avatar: Son Hava Bükücü'deki Toph Beifong ya da Marvel'ın Daredevil karakteri gibi kurgusal karakterlerin* yaptığı ekolokasyon, genellikle siyah zemin üzerinde yayılan ve nesnelerin kenarlarını belirleyen eşmerkezli beyaz çizgilerle betimlenir. Özde kısmen doğrudur bu: Kish, etrafındaki üç boyutlu uzayı hissedebiliyor. Ama yarasaların ultrasonik frekansları olmadan Kish'in sonarının çözünürlüğü düşük kalır. Kenarlar belirgin değildir. Nesneler sınırlarından çok, yoğunluk ve dokularıyla tanımlanır. Kish'e göre bu nitelikler "ekolokasyonun rengi gibidir." Onun duyusal dünyasını düşünürken, dilini her şaklattığında bilinç düzeyine çıkan, suluboyayla yapılmış bir heykel resmi hayal ediyorum. Nesneler, ana hatları belirsiz olan, "tonları" farklı doku ve yoğunlukları ifade eden lekelerle temsil edilir.† Kish, yürüyüşümüz sırasında karşımıza çıkan ağacın, üzerinde daha büyük ve daha yumuşak bir topak olan bir direk gibi ses verdiğini söylüyor. Tahtadan yapılmış bir çit, ona göre, dövme demirden daha yumuşak ve her ikisi de tel örgüden daha tok bir ses veriyor. Yaşadığı sokakta, sesleri daha belirsiz olan çalıların arasındaki ahşap kapının verdiği canlı ses, ona eve geri döndüğünü haber veriyor. Beklenmedik dokuların bir araya gelmesi zaman zaman kafasını karıştırıyor. Kısmen kaplanmış bir garaj yolunda, lastikleri betonun, şasisiyse çimlerin üzerine gelecek şekilde park edilmiş bir arabanın yanından geçiyoruz. Kish geçerken durup, orada çimlerin üzerine park edilmiş bir araba olup olmadığını soruyor.

Kish için ekolokasyon özgürlük demek. Şehirde dolaşıyor, bisiklete biniyor, tek başına yürüyüşe çıkıyor. Üstelik bunu yapan tek insan o değil. 1749'dan beri, kalabalık caddelerde yardımsız yürüyen ya da (sonraki yüzyıllarda) engellerin etrafından bisikletle dolanan,

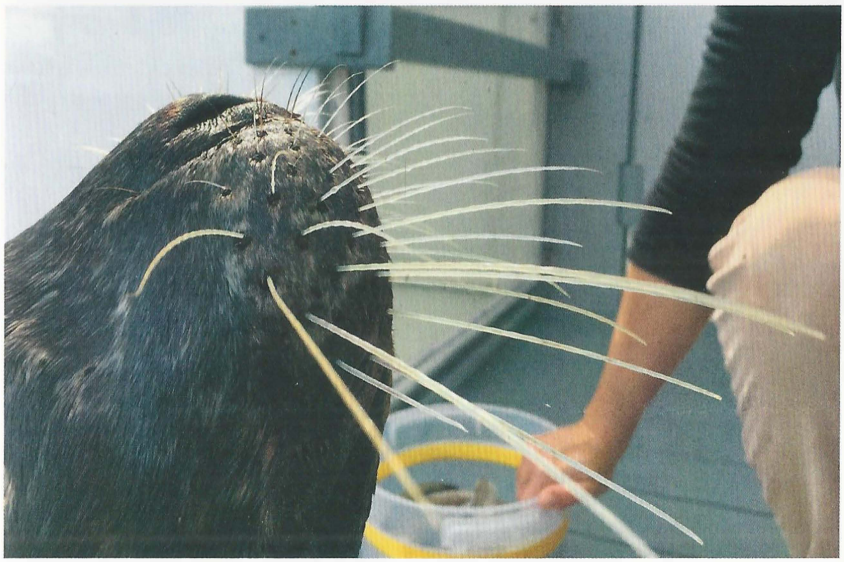
---

* Toph'un yeteneği daha çok ağaçpirelerinin sismik duyularına benziyor; Daredevil'ın ise "radar duyusu"nu kullanmak için ses çıkarması gerekmiyor. Yani ikisininki de gerçek ekolokasyon değil. Ayrıca Kish ve ekolokasyon yapan diğer insanlar genellikle "gerçek hayattaki Batman"ler olarak tanımlansalar da yarasalar ekolokasyon yaptığı, Batman ise yapmadığı için bu doğru bir kıyaslama değil.

† Netflix'te yayınlanan *Daredevil* dizisinde karakterin radar duyusu, çizgi romandakinden farklı betimlenir. *Daredevil* bunu, karakterin daha soğuk bir fon üzerinde kırmızı bir leke gibi göründüğü "alev alev yanan bir dünya" olarak tarif eder. Bana göre bu tarif, insandaki ekolokasyonun doku detaylarını yakalama özelliğine biraz daha yakındır.

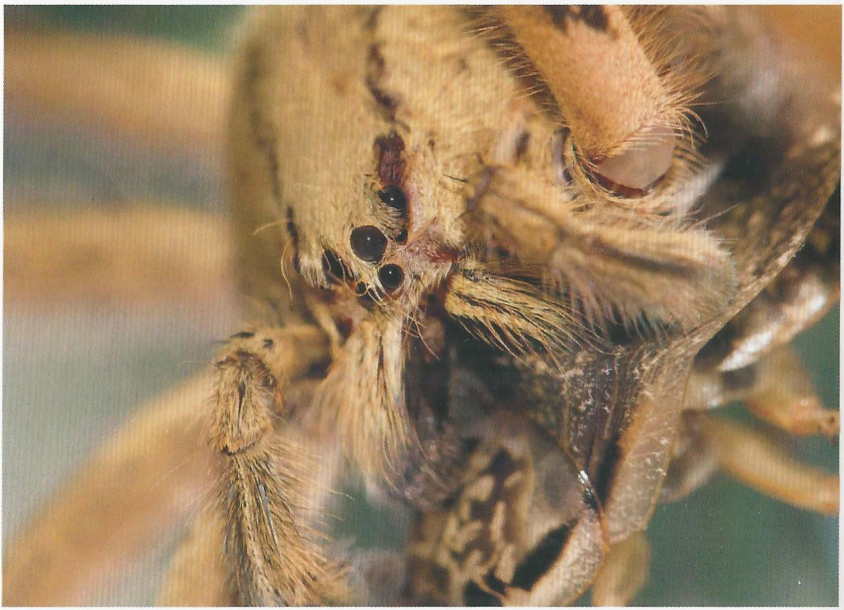


Liman foku Sprouts, gözleri bağlıyken bile bıyıklarını kullanarak balıkların suda bıraktığı görünmez izleri takip edebilir.





Kur yapan tavus kuşları, yarattıkları hava akımı örüntülerini sorguç tüyleriyle hissedebilir.

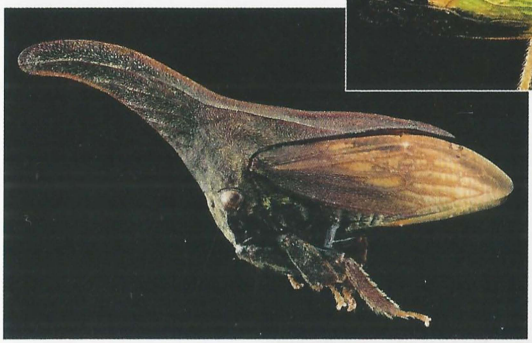


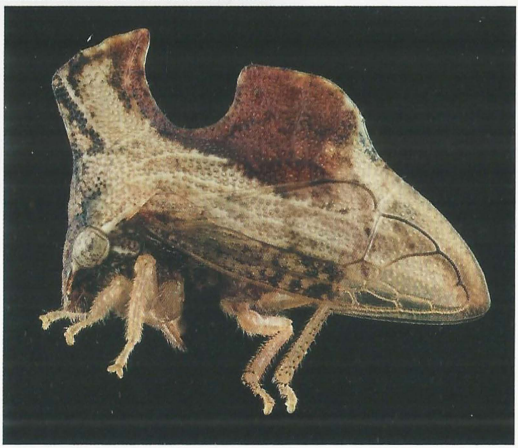
Kaplan gezgin örümceği, yakınından geçen sineklerin oluşturduğu hava akımlarını hassas kıllarıyla hissedebilir.



Ağaçpireleri, üzerinde durdukları bitkiler boyunca titreşimler göndererek haberleşir. Normalde duyamadığımız bu titreşimler sese çevrildiğinde kuşların, maymunların ya da müzik aletlerininkine benzer.









Kum akrebi, avının ayak seslerini hissedebilir. Altın köstebek, termitten zengin kumulların üzerinde esen rüzgârın yeknesak sesini saptayabilir. Ağaç kurbağasının iribaşları, çiğneyen bir yılanın yarattığı titreşimleri hissedince yumurtadan çıkar.





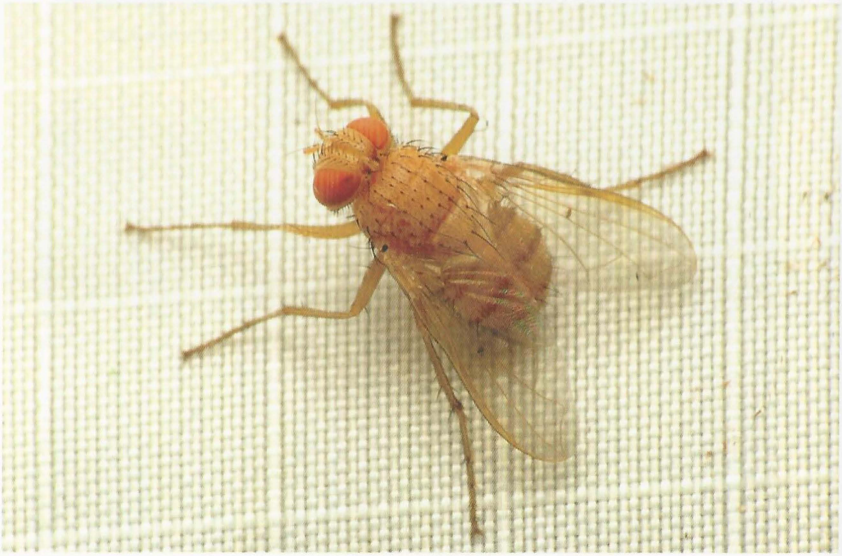




Altın ipek küre örücü örümceğinin ağı, örümceğin duyu sisteminin ve zihninin bir uzantısıdır ama Argyrodes *örümceği bu ağı kaçak kullanabilir.*



İşitme duyusunun bu iki ustası, sesin tam olarak nereden geldiğini mükemmelen saptar. Peçeli baykuş kaçışan kemirgenleri, asalak Ormia *sineğiyse kur yapan ağustosböceklerinin seslerini dinler.*





Erkek túngara kurbağasının çağrısını dişi kurbağa kulağının duyusal yanlılığı biçimlendirmiştir.



Zebra ispinozları, birbirlerinin ötüşünde insanların algılayamayacağı ince detayları dinler.



Mavi balinalar ve Asya filleri düşük frekanslı infrasonik çağrılarla uzak mesafeler arasında iletişim kurabilir.





Filipin tarsiyerleri, bizim duyamadığımız ultrasonik frekanslarla haberleşir.

Büyük mum güvesi, hiçbir hayvanın işitemeyeceği kadar yüksek frekansları duyar.





Tuhaf ama mavi gerdanlı sinekkuşu kendi ötüşündeki ultrasonik sesleri duyamaz.



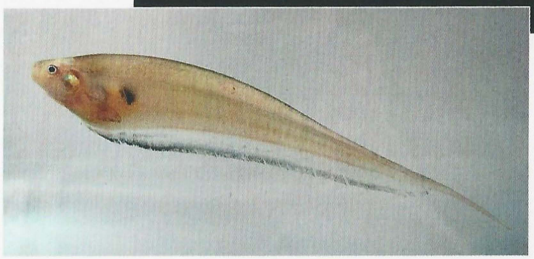
Büyük kahverengi yarasa, ay güvesine saldırırken.
Renkli spektrogram ekolokasyonu yansıtmaktadır:
Yarasa güveye yaklaşırken daha hızlı ve kısa sinyaller
gönderdiğinden daha detaylı bir görüntü oluşur.



Yunuslar, sonarlarının yardımıyla gömülü nesneleri bulabilir, oluşumların koordinatlarını saptayabilir, hava keselerinin şekline göre farklı balıkları birbirinden ayırabilirler.

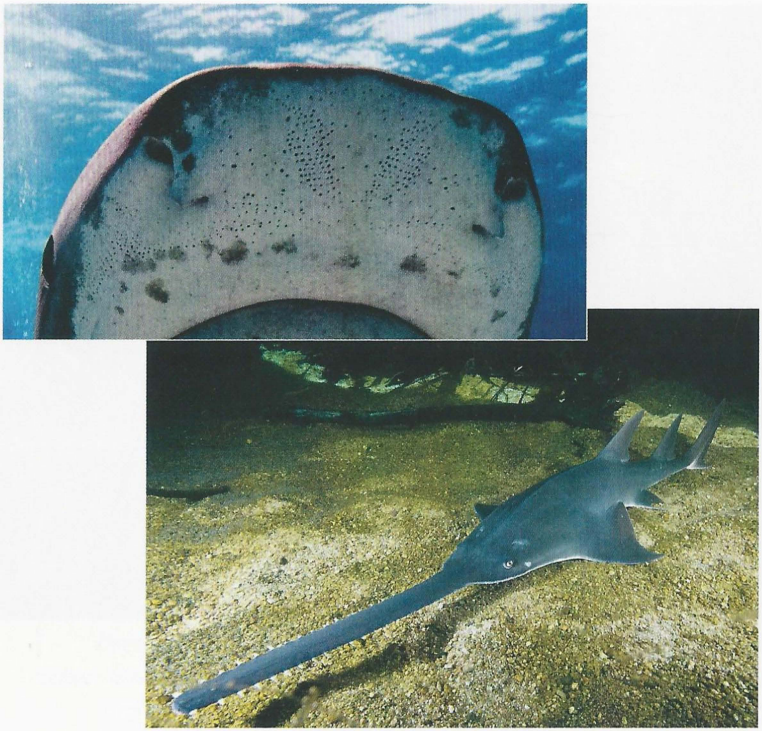




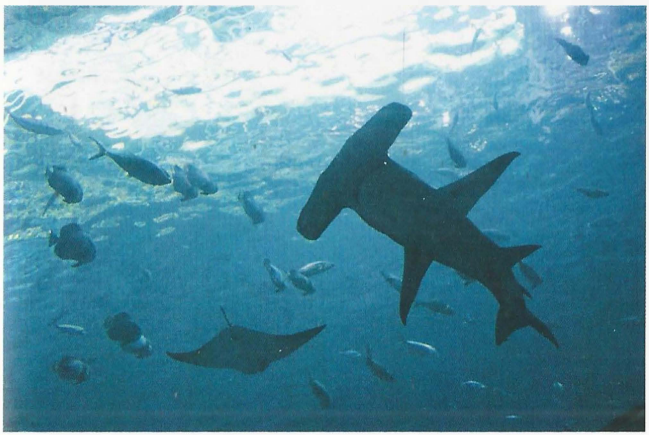


Kara hayalet bıçakbalığı, elektrikli yılanbalığı, cam bıçakbalığı ve Ubangi filbalığı, ürettikleri elektrik alandan faydalanarak etraflarındaki dünyayı algılarlar.





Köpekbalıkları ve vatozlar, Lorenzini ampulleri olarak adlandırılan minik gözeneklerle avlarının ürettiği zayıf elektrik alanlarını saptayabilir. Özellikle testerebalığı ve çekiçkafalı köpekbalığının kafasında çok sayıda Lorenzini ampulü bulunur.

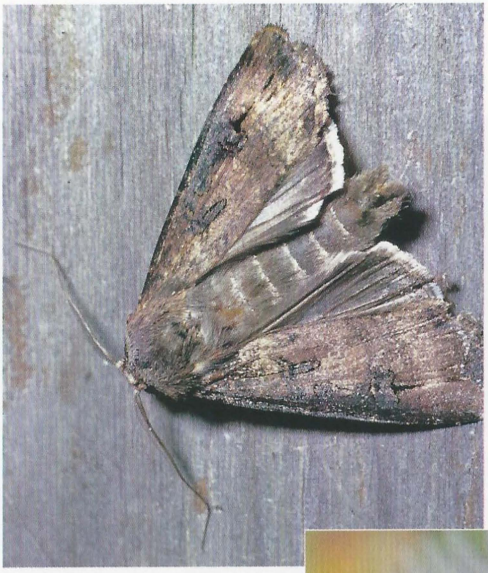


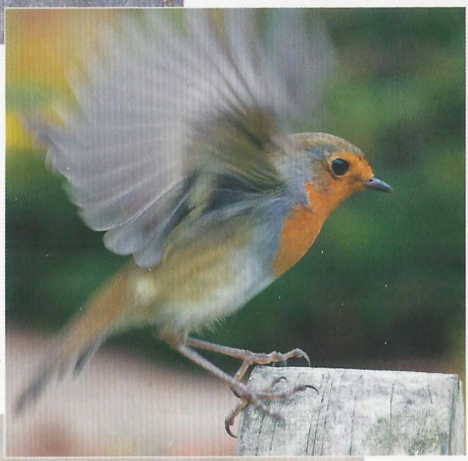


Ornitorengin hem basıncı hem de elektrik alanlarını algılayabilen gagası, bu ikisini bir araya getirerek tek bir elektro-dokunma duyusu yaratıyor olabilir.



Bombus arıları, çiçeklerin elektrik alanlarını algılayabilir.





Bogong güveleri, kızılgerdanlar ve deniz kaplumbağaları Dünya'nın manyetik alanını algılayarak göç sırasında uzak mesafeler katedebilir.





Ahtapotun kolları kısmen bağımsızdır; bu kollar, merkezî beyinden talimat almaksızın dünyayı hissedebilir ve araştırabilir.

kalabalık buz pistinde paten kayan kör insanlara dair anekdotlar anlatılıyor.[95] Ekolokasyon tanımı daha ortada yokken bile, insanlar asırlardır bu yöntemi kullanıyordu. Bu beceri geçmişte "yüzle görme" ya da "engelleri hissetme" olarak tarif edilmişti. Araştırmacılar, ekolokasyon yapan insanların da yarasalar gibi deri üzerinde meydana gelen hafif hava akımı değişikliklerini hissettiğine inanıyordu. Ekolokasyon yapanlarsa çoğu zaman algılarının doğası konusunda şaşkına dönüyordu.*

Michael Supa'yı ele alalım. Psikoloji öğrencisi Supa çocukluğundan beri kördü. Günlük yaşamında uzaktaki engelleri tespit edebildiği halde bunu nasıl yaptığını açıklayamıyordu. Yolunu bulmak için çoğunlukla parmaklarını şıklattığı ya da topuklarını yere vurduğu için bunun işitmeyle ilgili olduğundan şüpheleniyordu. 1940'larda bu varsayımını sınadı.[96] Supa, biri kör diğer ikisi görebilen ama gözleri bağlı üç öğrencisiyle birlikte, büyük bir salonda işitme duyularını kullanarak büyük bir sunta plakanın yerini saptayabildiklerini gösterdi. Bu yöntem, parke üzerinde ayakkabıyla yürüdüklerinde en iyi sonucu veriyor, halı üzerinde çorapla yürüdüklerinde daha az işe yarıyor, kulaklarını tıkadıkları zamansa hiç işe yaramıyordu. Daha çarpıcı bir gösteride Supa gözleri bağlı meslektaşından, bir mikrofonla sunta plakaya doğru yürümesini istedi. Yakındaki ses izolasyonlu odada oturup sesleri kulaklıkla dinleyen Supa, plakanın nerede olduğunu ve meslektaşının ne zaman durması gerektiğini söyleyebiliyordu.

Bu deneyler tesadüfen, yaklaşık olarak Griffin ve Galambos'un yarasalar üzerinde çalıştıkları dönemde yapılıyordu. Supa 1944'ün başlarında sonuçlarını yayımladığında yarasa çalışmalarına atıfta bulunmuştu ve Griffin aynı yıl *ekolokasyon* terimini kullanırken Supa'ya atıfta bulunarak hem yarasaların *hem de kör insanların* becerilerini tarif ediyordu.[97] Ancak yarasa sonarı popüler bilginin ortak bir parçası haline gelirken insan ekolokasyonu için böyle bir gelişme olmadı. Kish bugün bile "insanların ekolokasyon yapabildiğine dair hiçbir fikri olmayan" ekolokasyon araştırmacılarıyla karşılaştığını söylüyor. "İnsan

* Kish, şaklamaların işleyişini ancak uzun zaman sonra dile getirebildiğini söylüyor ama daha öncesinde de bir şekilde işe yaradığını biliyormuş.

biyosonarı, üzerinde çalışmaya değmeyecek kadar basit bulunduğu için göz ardı edildi." Bunun, körlüğün hâlâ çok fazla olumsuz anlamlandırma taşımasından kaynaklandığını düşünüyorum. Bir şeye karşı körleşme, o şeyin farkında olmama anlamına gelir. Kör nokta, trafikte sürücünün geriden gelenleri aynada göremediği bölgedir. Vizyon sahibi olmamak, yaratıcılıktan yoksun olmak anlamında kullanılır. Engelli ayrımcılığı yapan bu ifadeler, görme duyusu yoksunluğunu farkındalık yoksunluğuyla bir tutar. Oysa kör insanlar çevrelerinin son derece farkındadırlar.*

Kish, görebilen insanların yapamadığını ekolokasyonla yapıp arkasındaki, köşelerin ardındaki ya da duvarların öte tarafındaki nesneleri algılayabiliyor. Fakat görerek kolayca halledilebilecek bazı işleri sonarla yapmak çok zor. Arkaplandaki büyük nesneler, önlerindeki daha küçük nesnelerin yankılarını maskeler. Yarasaların, yaprakların üzerindeki böcekleri saptamakta zorlanması gibi, Kish ve ekolokasyon yapan diğer insanlar da denemeleri istendiğinde çoğu zaman sinir bozucu bir iş olan, masa üstündeki cisimlerin yerini saptamada zorlanırlar. "Kâğıt mendil kutusu, zımba ya da başka ıvır zıvırı o masif hedeften ayırt etmeye çalışırsın," diyor Kish. "Beyaz kâğıt üzerindeki beyaz yazıyı okumaya benzer." Kish yanlış açıda durup dilini şaklatırsa duvarın önünde duran birini bazen tamamen ıskalar. Yükselen eğimde (yokuş yukarı) yüzeyleri saptamak, alçalan eğimde (yokuş aşağı) yüzeyleri saptamaktan daha

* Kish, körlerin çoğunlukla en azından duvara çarpmamak ya da koridor boyunca yürümek için yeterli olan bu körelmiş ekolokasyon biçimini kullandığını söylüyor. Çevreye dair bu temel farkındalığı "tek renkli" (monokromatik) olarak tanımlıyor. Görebilen insanlar dahi bunu yapmayı çabuk öğrenir. Ekolokasyon konusunda yetkin olanları farklı kılan şey, daha uzak mesafelerdeki ince ayrıntıları, daha az çaba harcayarak seçebilmeleridir. Tüm duyularımız gibi işitme duyumuz da gürültüden sinyali çekip çıkarmaya elverişlidir; böylece ortam gürültüsü içinde konuşmaları, bir partideki konuşmalar arasında kendi adımızı ya da yolda giderken siren sesini duyabiliriz. "Ekolokasyon yapıyorsanız bu filtreyi tersyüz etmeniz gerekir çünkü normalde arkaplan olarak göz ardı ettiğimiz seslerin ambiyansı ve akustik yansımalar ekolokasyonda asıl ayırt edilmesi gereken unsurlar haline gelir," diyor Kish. Onun açısından sinyaller, diğer kulakların çoğunlukla gürültü olarak duyduğu seslere gömülüdür. O nedenle ekolokasyonda yetkin olabilmek için çok pratik yapmak gerekir.

kolaydır. Köşeli nesneler yuvarlak olanlara, sert nesnelerse yumuşak olanlara göre daha kolay algılanır. Kish, bir Alman TV kanalı programında yaşadığı unutulmaz bir deneyimde, ekolokasyonla bir şampanya şişesini peluş oyuncaktan ayırt edemediğini anlamış. Uca doğru sivrilen kavisli şişe şaklamaları çok fazla yöne yansıtırken, peluş oyuncak sesleri soğurur. O nedenle ikisi de net bir biçim ya da doku algısı oluşturacak kadar enerji yansıtmadığından, "Beynim ikisini aynı şekilde algıladı," diyor Kish. "İkisini bir türlü birbirinden ayıramadım."

Uygulamada bu zorluklar aslında o kadar da zorlayıcı değil çünkü Kish asla sadece ekolokasyona bel bağlamıyor. Evinde neyi nereye koyduğunu hatırlıyor. Evin civarında dolaşırken sokakların planını hatırlıyor. Pasif işitme ve dokunma gibi diğer duyuları kullanıyor. Yolda yürürken yaklaşan araçları ekolokasyonla saptamadan önce duyabiliyor. Kaldırımda dururken, yol kenarına yakın olup olmadığını sonarıyla kestiremese de bastonuyla kolayca anlayabiliyor. Yıllar önce, biraz daha genç ve gözü karayken, diğer kör arkadaşlarıyla birlikte dağ bisikleti sürmeye giderlermiş. Görebilen bir arkadaşları önden gider, diğerleri onu takip edermiş. Bisikletlerin arkalarına birer kablo bağı takmışlar, böylece plastik metale sürtündükçe herkes birbirinin nerede olduğunu anlayabiliyormuş. Araziyi daha iyi hissetmek için sert süspansiyonlu bisikletler seçmişler. "Bir de herkes dil şaklatıyordu tabii," diyor Kish.

Kish 2000'de, diğer kör insanlara ekolokasyonu öğretmek için kâr amacı gütmeyen World Access for the Blind'ı [Körler İçin Dünyaya Erişim] kurdu. Kish ve kendileri de kör olan diğer eğitmenler, onlarca ülkede binlerce öğrenciye eğitim verdiler. Ekolokasyon hâlâ çok sınırlı bir kitle tarafından kullanılan ve görme engelliler topluluğunun bazı kesimlerince sosyal açıdan uygunsuz, geleneğe aykırı ya da kendini aşmış birkaç kişi dışında herkes için çok zor olduğu gerekçesiyle onaylanmayan bir beceri. Kish aynı fikirde değil. Ekolokasyon yapan daha fazla kişiye öğretme şansı verilirse bu becerinin yaygınlaşabileceğini düşünüyor. Kish, ABD'de oryantasyon ve hareketlilik uzmanı (görme engellilere hareket edip dolaşmayı öğreten kişi) sertifikası almış ilk görme engelli. "Körlerin diğer körlere nasıl kör olunacağını öğretmesine karşı aktif bir direnç var," diyor. "Yaptığımız şey, bir çeşit destekleyici gözetim." Kish, görme engelli pek çok çocuğun doğal yoldan sesle çevresini

araştırmaya çalıştığını söylüyor. Bazıları dilini kullanmak yerine parmaklarını şaklatabilir ya da ayaklarını yere vurabilir. Ama ebeveynler çoğu zaman, çocuk henüz incelikli bir sonar sistemi geliştiremeden, tuhaf ya da antisosyal olarak gördükleri bu davranışları engelliyor. Kish'in annesiyle babası bunu asla yapmamışlar. Dil şaklatmasına izin vermişler. Ona bisiklet almışlar. "Körlüğümü büyütmediler ve hareket etme, keşfetme, çevremle ilişki kurma özgürlüğümü desteklediler," diyor Kish. Bu özgürlük de sonunda beyninin doğasını değiştirmiş.

Nörobilimci Lore Thaler, 2009'dan beri Kish'le çalışıyor.[98] Thaler, Kish'in ve ekolokasyon yapan diğer insanların, yankıları duyduklarında, görme kortekslerinin (normalde beynin görme duyusuyla ilgili bölgesi) son derece etkin olduğunu beyin tarama cihazları kullanarak gösterdi. Görebilen insanlar aynı uyaranları duyduklarında, beynin aynı bölgeleri sessiz kalır. Bu, Kish'in yankıları "gördüğü" anlamına gelmez. Daha çok, yankılardan gelen bilgiyi düzenleyerek, görme duyusunun doğal olarak mükemmelleştiği, çevrenin uzamsal bir haritasını oluşturma işini yapabildiğini ifade eder. Beyin, yeni bir amaç kazandırdığı görme korteksini yankı işleyen korteks olarak kullanarak, görme duyusu olmadan da benzer haritalar oluşturabilir.[99*] Böylece Kish, kendi konumuna göre nesnelerin yerlerini duyabildiği gibi, birbirlerine göre konumlarını da bilir.[100] Bu beceri muhtemelen yürüyüşten bisiklete binmeye, Kish'in yaptığı daha da etkileyici şeylerin çoğunu açıklıyor. Belleği, bastonu ve diğer duyuları ona bilgi veriyor ama Kish dilini şaklatarak bu bilgiyi uzamda bir temele oturtuyor. Thaler, "Onun uzamı anlama becerisi, küçük yaşlardan beri görmeyen çoğu insanınkinden temelde daha iyi," diyor. Bu beceri ömür boyu süren pratiğin ve etkin araştırmanın bir sonucudur.

Bu bölümde daha önce yunuslardan söz ederken, ekolokasyonun basitçe "sesle dokunmak" şeklinde tanımlanabileceğine değinmiştim. Kish de aşağı yukarı böyle düşünüyor. "Dokunma duyumun bir uzantısıymış gibi geliyor bana," diyor. Amaçlı ve araştırıcı. Kish de bir yarasa gibi, dünyayı kendini belli etmeye zorluyor. Bütün duyular bazı

* "Görme korteksi"nin doğru adlandırılıp adlandırılmadığı ve aslında "her zaman olmasa da genellikle gözlerle bağlantılı uzamsal haritalama korteksi" olup olmadığı sorulabilir.

açılardan böyle olabilir. Alıcı kuş gözleriyle etrafına bakabilir, yılan dilini havada titreterek koku toplayabilir, yıldız burunlu köstebek yıldız biçimli burnunu yuvasının duvarlarına bastırabilir, sıçan bıyıklarını temizleyebilir ve yangın böceği kanat çırparak kızılötesi dedektörlerini duyarlı hale getirebilir. Ancak ekolokasyon yapan bir yarasa, yunus ya da insan, aksi istenmediği takdirde *her an* keşif halindedir. Şu ana kadar ekolokasyon, daima böyle aktif çalışan, karşılaştığımız tek duyuydu.

Böyle bir duyu daha var.

10.

Canlı Piller

Elektrik Alanları

Eric Fortune'un Newark, New Jersey'deki laboratuvarındayım; elektrik üretebilen pek çok balıktan biri olan bir elektrikli yayınbalığının bulunduğu akvaryum tankına bakıyorum. Bu kızıl-kahverengi, tombul balık yüzgeçli bir tatlı patatese benziyor. Fortune ona Blubby adını vermiş. Şüphelerimi gidermek için balığın verdiği elektrik şokunun bayağı hissedildiğini ama bir pili yalamaktan daha kötü olmadığını söylüyor. "Çarpılmak istiyorsan çarpılabilirsin," diyor. Ziyarete gelen gazetecilerin toyluğundan faydalanıp onlara kötü bir şaka yaptığından işkillenmeme rağmen elimi tanka uzatıyorum. Blubby geri çekilmiyor. Bense anında irkiliyorum. Kaslarım, balıktan gelen elektrik boşalmasının etkisiyle kasılınca elimi refleksle tanktan çekip not defterime su sıçratıyorum. Parmaklarımdaki karıncalanma bir saat kadar sürüyor. "Yaklaşık 90 volt," diyor Fortune. "Tecrübe etmen iyi oldu."

Elektrik üretebilen 350 civarında balık türü var ve elektriğin ne olduğu bile henüz bilinmiyorken, insanlar onların bu yeteneğinden haberdardı.[1] Yaklaşık 5 bin yıl önce Mısırlılar mezarların üzerine, Blubby'nin atalarının tasvirlerini oydular.[2] Eski Yunanlar ve Romalılar elektrikli vatozun "uyuşturan" gücü hakkında yazmışlardı; küçük balıkları öldürebilen, balık avlayan birinin elindeki zıpkından koluna doğru yükselen ve baş ağrısından hemoroide her derde deva, tuhaf bir

kuvvetti bu.* Bu deşarjların gerçekte ne olduğu, biliminsanları elektriği fiziksel bir varlık olarak tanımladıktan ve hayvanların elektrik üretebildiğini anladıktan sonra, ancak on yedinci ve on sekizinci yüzyıllarda açıklığa kavuştu.

Elektrikli balıklarla ilgili çalışmalar daha sonra elektrik üzerine yapılan çalışmalarla iç içe geçti. Bu hayvanlar ilk yapay pilin tasarımına ilham verdi. Tüm hayvanlarda kas ve sinirlerin çok küçük akımlarla çalıştığının keşfedilmesine öncülük ettiler. Nitekim elektrikli balıklarda bu benzersiz güç, kas ve sinirlerin özel elektrik organlarına dönüşmesiyle evrildi. Bu organlar, yan dönmüş krep kuleleri gibi bir araya toplanmış elektrosit denen hücrelerden oluşur. Bir balık, iyon denen yüklü parçacıkların bir elektrositten akışını kontrol ederek hücrede küçük bir voltaj yaratabilir. Üst üste dizili hücrelerin hepsini birden ateşleyerek çok küçük voltajları birleştirip kayda değer voltajlar oluşturabilir.

Bunu en iyi yapabilenler elektrikli yılan balıklarıdır.[4] Bu hayvanların, 5 bin - 10 bin elektrositten oluşmuş 100 civarında hücre yığını içeren elektrik organları iki metre uzunluğundaki vücutlarının büyük bölümünü kapsar. Üç yılan balığı türü, bir atı etkisiz hale getirebilecek kadar güçlü olan 860 voltluk bir deşarj yaratabilir.† Yılan balığı, acımasız gücünü fesat bir ustalıkla kullanır. Küçük balıkları ve omurgasızları avlarken, avının kaslarında seğirmelere yol açarak yerini belli eden darbe sinyalleri (elektrik atımları) gönderir. Ardından daha güçlü atımlarla aynı kasları kilitleyerek kurbanını felç eder. Yılan balığının, diğer

---

* Eski Yunanlar elektrikli vatoza *nárkē* derlerdi; günümüzde kullanılan narkotik sözcüğü bu kökenden gelir. Elektrikli balıkların ve bilime katkılarının tarihi büyüleyicidir ve benim bu konuya ayırdığım paragrafın yeterli olamayacağı kadar zengindir. Daha kapsamlı bir açıklama için Stanley Finger ve Marco Piccolino'nun *The Shocking History of Electric Fishes* adlı kitabına başvurabilirsiniz.[3]

† Bu, abartılı, uydurma bir hikâye değil. 1800'de, Güney Amerika'daki Chayma balıkçıları, elektrikli yılan balıklarını otuz at ve katırla çekerek balık dolu bir havuza getirmesi için doğabilimci Alexander von Humbolt'a yardım etmişlerdi.[5] Yılan balıkları sudan sıçrayıp atlarla temas edince hayvanları elektrik çarptı. Kargaşa yatıştıktan sonra, yorgun balıkları kolayca topladılar. Bu olay sırasında iki at öldü.

hayvanların vücutlarına uzaktan el koymasını sağlayan elektrik organı hem uzaktan kumanda hem de elektrik tabancasıdır.*

Elektrikli balıkların çoğu daha iyi huyludur. Yarattıkları deşarjlar insanlar tarafından zar zor hissedilir.[7] Zayıf elektrikli balıklar olarak bilinen bu hayvanlar iki ana gruba ayrılır: Afrika'ya özgü filbalıkları ve Güney Amerika'ya özgü bıçakbalıkları. (Elektrikli yılan balığı, adına rağmen aslında bir bıçakbalığıdır ve güçlü deşarjlar üreten takımın tek üyesidir). Zayıf elektrikli balıklar, on dokuzuncu yüzyılda Charles Darwin dahil biliminsanlarının kafasını karıştırmıştı. Darwin, elektrikli yılan balıkları ve elektrikli vatozlardaki güçlü elektrik organlarının, normal kasın daha zayıf bir ara evreden geçmesiyle oluştuğu kuramını ortaya atmıştı ve haklıydı. Fakat zayıf elektrik organları, hiçbir işe yaramasa evrilmezlerdi. Bu organlar saldırı ya da savunma için fazla güçsüz kaldığına göre ne işe yarıyordu? Darwin 1859'da çığır açan yapıtı *Türlerin Kökeni*'nde, "Bu muhteşem organların hangi aşamalardan geçerek oluştuğunu anlamak imkânsız," diye yazmıştı. "Ama onların ne için kullanıldığını bile bilmediğimiz için bu hiç şaşırtıcı değil."[8]

Darwin huzur içinde uyuyabilir. Yüz altmış yıl süren araştırmanın ardından bıçakbalıklarının ve filbalıklarının çevreyi algılamak, hatta birbirleriyle iletişim kurmak için elektrik alanlarından faydalandığı açıklık kazandı. Yarasa için yankılar, köpek için kokular ve insan için ışık neyse, bu balıklar için de elektrik odur: Umwelt'lerinin nüvesi.

Malcolm MacIver küçük bir tanka bir elektrot daldırıp dinlememi söylüyor. Cihaz saniyede 900 kez salınım yapan bir elektrik alanı saptıyor. Bu alanı, yakındaki bir hoparlörden yükselen, orta do'dan aşağı yukarı iki oktav yüksek, tüyler ürpertici bir soprano sese

* Asırlardır bilinmelerine rağmen elektrikli yılan balıkları hakkında bildiklerimizin çoğunu daha yeni keşfettik. Yıldız burunlu köstebekler, toprak solucanları ve timsahlardan oluşan eklektik bir grubun meraklısı Ken Catania, elektrikli yılan balıklarının avlarını uzaktan kontrol edebildiğini gösterdi. Carlos David de Santana öncülüğünde bir ekip ise bu simgesel hayvanın aslında üç farklı türü kapsadığını ve bunlardan birinin daha önce hiç kimsenin ölçmediği kadar yüksek voltaj oluşturduğunu gösterdi.[6]

dönüştürüyor. Böylece tankın sessiz sakinini, kara hayalet bıçakbalığını duyabiliyoruz.*

Kara hayalet elim uzunluğunda. Acı çikolata rengi bu balığın bıçağa benzeyen gövdesi, geniş kafasından sivri kuyruğuna doğru incelerek uzanıyor. Gövdesinin altında boylu boyunca uzanan, kurdeleye benzeyen yüzgeç suda sürekli dalgalanıyor. Bu yüzgeç, balığın tekinsiz bir çeviklikle her yöne hareket etmesini sağlar. Tankın dibindeki bir silindirin ortasında duran balık, silindirden dışarı fırlayıp aynı rahatlıkla tekrar içeri giriyor. Baş aşağı dönüyor. Geriye sıçrıyor ve tankın arka duvarına çarpmak üzereyken bükülüp duvardan yukarıya geri geri kayıyor. "Hans Lissmann, neler olduğunu böyle anlamıştı," diyor MacIver.

Hans Lissmann, Umwelt kavramının adını koyan Jakob von Uexküll ile çalışmış, Ukrayna doğumlu bir zoologdu.[9] İki dünya savaşından sağ çıktıktan sonra Britanya'ya gitti. Londra Hayvanat Bahçesi'ne yaptığı önemli ziyaret sırasında bir Afrika bıçakbalığının, bulunduğu tankta engellerden ustaca kaçarak nasıl geri geri yüzdüğünü izledi.[10] Komşu tankta bir elektrikli yılan balığının aynı beceriyi sergilediğini gördü ve her iki balığın da etraflarındaki nesneleri algılamak için elektriği kullanıp kullanmadığını merak etti. Çok geçmeden bir arkadaşı düğün armağanı olarak kendisine bir bıçakbalığı verince bu varsayımını sınama şansı oldu.†

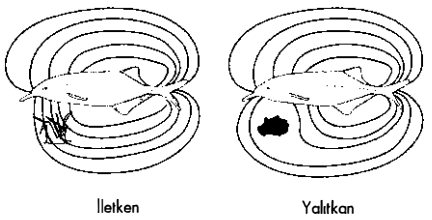
Lissmann 1951'de bu hayvanın, kuyruğundaki organla sürekli bir elektrik alanı oluşturduğunu elektrotlarla doğruladı.[11] İletkenliği suyunkinden daha az ya da daha fazla olan nesnelerin bu alanı bozduğunu fark etti. Bıçakbalığı muhtemelen bu bozulmaları algılayarak, onları üreten

* MacIver bir keresinde, her biri ayrı bir tankta bulunan 12 farklı elektrikli balık türünden bir müzikal enstalasyon yaratmıştı. Balıkların hepsi farklı frekanslarda elektrik alanları üretiyor, tanklardaki elektrotlar bu alanları müzikal seslere dönüştürüyordu. Ziyaretçiler bir ses mikseri vasıtasıyla tanklardan her birinin sesini açıp kısarak bu elektrik orkestrasını yönetebiliyordu. "İnsanların elektrikli balıkları takdir etmemelerinden biraz sıkılmaya başlamıştım ve merak uyandırabilecek harika hayvanlar olduklarını vurgulamak istedim," diyor MacIver.

† Lissmann'ın üzerinde çalıştığı tür Afrika bıçakbalığı olarak adlandırılsa da kafa karıştırıcı biçimde, hepsi Güney Amerika'da yaşayan gerçek bıçakbalıklarından çok, filbalıklarıyla daha yakın akrabadır. Neyse ki kara hayalet bıçakbalığı sahiden de bir bıçakbalığıdır; rengi kesinlikle siyaha çalar ve oldukça hayaletimsi görünür.

şeyleri saptayabiliyordu.[12] Lissmann ile meslektaşı Ken Machin bu becerinin sınırlarını derinlemesine araştırınca hayrete düştüler. Bir bıçakbalığı biraz eğitimle içinde yalıtkan bir cam çubuk bulunan bir toprak kâseyi, özdeş boş bir kâseden ayırabiliyordu. Hatta sadece saflık dereceleri farklı olan su karışımlarını bile ayırt edebiliyordu. İnsanların sahip olduğu hiçbir şeye benzemeyen bir elektrik duyusuna sahip olduğu açıktı. Lissmann ile Machin'in sonuçlarını 1958'de yayımlamasıyla onlarca yıl içinde ikinci kez garip ve yeni bir duyu resmen belgelenmiş oluyordu.[13] Sadece 14 yıl önce Donald Griffin, yarasa sonarını tarif etmek için *ekolokasyon* terimini kullanmıştı. Buna uygun olarak, elektrikli balıkların aynı derecede garip olan yeteneği de *aktif elektrolokasyon* olarak adlandırıldı ("Aktif" nitelemesinin sebebini daha sonra öğreneceğiz.)

Balığın kuyruğundaki elektrik organı küçük bir pile benzer. Çalıştığı zaman hayvanı kuşatan bir elektrik alanı yaratır. Akım suda, elektrik organının bir ucundan diğer ucuna doğru ilerler. Yakındaki iletkenler, örneğin hayvanlar (hücreleri tuzlu sıvıyla dolu torbalar gibidir) akımı artırır. Kaya gibi yalıtkanlarsa azaltır. Bu değişimler, balığın derisinin farklı bölümlerindeki voltajı etkiler. Balık, elektroreseptör denen duyu hücrelerini kullanarak bu değişimleri saptayabilir.[14] Kara hayalet bıçakbalığının vücudunda dağınık halde 14 bin elektroreseptör bulunur; balık bu reseptörleri kullanarak çevresindeki nesnelerin konumunu, büyüklüğünü ve uzaklığını anlar.[15] İnsanların, retinaya düşen ışık örüntülerinden dünyaya dair görüntüler yaratması gibi, elektrikli balıklar da derinin üzerinde dolaşan voltaj örüntülerinden, etrafa dair elektrik görüntüleri oluşturur. İletkenler görüntüyü parlaklaştırır. Yalıtkanlarsa görüntüye elektrik gölgeleri düşürür.



Bir filbalığı kendi elektrik alanını üretir; balığın çevresindeki iletken ya da yalıtkan cisimler bu alanda bozulmalar yaratır.

Böyle yabancı ve tanıdık olmayan bir duyuyu tarif ederken *görüntü* ve *gölge* gibi görsel terimler işe yarar. Ancak elektrolokasyon, görme duyusundan çok farklıdır. Bu duyuya sahip balıklar, diğer birçok hayvanın asla fark etmediği fiziksel nitelikleri önemserken, kör kör parmağım gözüne özellikleri görmezden gelirler. Eric Fortune doğadan elektrikli balıkları toplarken, fener tuttuğunda balıklar ışıktan etkilenmez. Fakat suya bir ağ daldırdığında, "Eğer açıkta metal varsa onları yakalayamazsınız," diyor. İletken metal bu balıklar için gerçek ışıktan daha önemli bir işaret ışığıdır.

Elektrikli balıklar tuz yoğunluğuna da duyarlıdır. Birçok bıçakbalığının yaşadığı Amazon havzasında şiddetli yağışlar iyonları düzenli olarak sudan uzaklaştırır. Tuzu azalmış bu ortamda, vücudu tuzla dolu iletken diğer hayvanlar, bu balıkların elektrolokasyonla kolayca saptayabileceği şekilde ön plana çıkar. Fakat Kuzey Amerika'da iyon miktarı nispeten fazla olan şebeke suyunda aynı hayvanlar ortamda kamufle olur. MacIver'ın laboratuvarı Illinois'nin Evanston şehrinde ve söylediğine göre, esaret altındaki kara hayalet bıçakbalığını o bölgedeki bir nehre bıraksa hayvan yiyecek bulmakta zorlanacağı için muhtemelen ölecektir. O nedenle, balığın bulunduğu tanktaki iyon düzeylerini, elektrikli balıklar üzerinde çalışan araştırmacıların kuşaktan kuşağa aktardığı bir tarife göre, hayvanın doğal ortamını taklit edecek şekilde ayarlıyor.* Kara hayalet Amazon'dan çok uzak düşmüş olsa da hiç değilse içinde yaşadığı suda belki de kendini evindeymiş gibi hissediyordur.†

Aktif elektrolokasyon, sürekli bir gayret gerektirmesi açısından ekolokasyona benzer. Diğer duyularda etkin olmak tercihe bağlıdır: hayvan burnunu çekerek havayı koklayabilir, gözlerini sağa sola hızla hareket ettirebilir, elleriyle dokunabilir ama bu organlar, uyaranların gelmesini de bekleyebilir. Ekolokasyon yapan yarasalar ve

---

* Bu tarife, öncü araştırmacı Leonard Maler'a ithafen "Maler'ın bataklık çamuru" adı verilmiş.

† Görünüşe göre bazı elektrikli balık türlerinin elektrik duyuları, dar aralıktaki tuz yoğunluklarında en iyi şekilde çalışır. Carl Hopkins 2009'da "Bunun en ilginç sonucu, bu balıkların su iletkenliği farklı olan nehir sistemlerine dağılmaya çalıştığında görünmez engellerle karşılaşabilmesidir," diye yazmıştı.[16]

elektrolokasyon yapan balıklarsa bekleyemez. Her ikisi de saptayabileceği uyaranı kendisi yaratmak zorundadır. Fakat bu duyular arasında tek bir temel fark var: *Elektrik alanları bir yerden bir yere gitmez.* Diğer duyuların hemen hemen hepsi, hareket eden uyaranlara bağlıdır. Koku molekülleri, ses dalgaları, yüzey titreşimleri, hatta ışık bile kaynaktan alıcıya yolculuk yapar. Oysa bir bıçakbalığı elektrik organını ateşlediği zaman, çevresinde derhal elektrik alanları oluşur. Bir yarasa gibi yankının dönüşünü beklemesi gerekmez. Elektrolokasyon anlık bir duyudur.

Aynı zamanda çok yönlüdür.[17] Bir elektrikli balığın oluşturduğu elektrik alanı ve buna paralel olarak farkındalığı da her yöne uzanır. Bu nedenle benim gördüğüm kara hayalet bıçakbalığı da Hans Lissmann'ı kendine hayran bırakan Afrika bıçakbalığı da arkasındaki engellere çarpmadan geri gidebilir. Bu balıklar bir kerede metrelerce geri geri yüzerken filme alınmış. "Beş metre geri geri yürüdüğünü düşün; yapamazsın," diyor Fortune. "Ama elektrikli balıklar yapabilir."

Onları çepeçevre saran bu duyuda bir bityeniği var. Elektrik alanları kaynaktan uzaklaşıldıkça hızla zayıflar; o nedenle elektrolokasyon yalnızca çok kısa mesafelerde çalışır. Kara hayalet bıçakbalığı birkaç milimetre uzunluğundaki su pirelerini yer ve bu minik lokmaları, vücudundan en fazla birkaç santimetre uzakta olduğu sürece hissedebilir. Bunun ötesinde, su pireleri saptanabilir olmadığı gibi, büyük nesneler bile belirsizdir. "Bu balıkların sürekli yoğun bir sis içinde yaşadığını düşünüyorum," diyor MacIver. Kara hayalet, daha güçlü bir elektrik alanı yaratarak farkındalık menzilini artırabilir ve bunu her gece, yiyecek aramaya başladığında yapar. Ama aşırı çaba da bir yere kadardır. Elektrik duyusunun menzilini iki katına çıkarmak için sekiz kat fazla enerji harcaması gerekir; dahası, toplam kalorisinin dörtte birini zaten elektrik alanları oluşturmak için harcar.[18]*

* Elbette elektrikli balıkların, görme gibi daha uzun menzilli başka duyuları da var. Filbalıklarının gözleri uzaktaki hızlı hareket eden, büyük nesnelere ayarlanmış gibidir; bu da teorik olarak yırtıcı hayvanları elektrik duyusunun menziline girmeden önce tespit etmelerine yardımcı olabilir.[19] Üstelik bu hayvanların çoğu, uzak mesafeyi görmenin imkânsız olduğu bulanık sularda yaşar. Ayrıca doğada birçok bıçakbalığı, gözlerindeki asalak solucanlarla gayet iyi geçinir; bu da onların görmeden de hayatta kalabileceklerinin tüyler ürpertici bir işaretidir.

Bu sınırlamalar, elektrikli balıkların çoğunun neden bu kadar çevik olduğunu açıklamaya yardımcı olur. Farkındalıkları çoğunlukla küçük bir duyu balonuyla sınırlı olduğundan, tespit ettikleri her şeye hızlı tepki vermeleri gerekir. Bir engel algıladıklarında aniden fren yapmak ya da hızla yollarını değiştirmek zorunda kalırlar. Yenilebilir bir şey saptadıklarında, yanından geçmiş gitmiş olabilecekleri için geri dönmek zorunda kalabilirler. MacIver, kara hayaletin tam da bunu yaptığı bir video gösteriyor. Başlangıçta yüzerek bir su piresinin yanından geçiyor ama daha sonra lokmayı yakalayacak kadar yaklaşıncaya dek geri gidiyor. U dönüşü yapmış olsaydı pire elektrik duyusunun menzilinden çıkıp kayıplara karışmış olacaktı. Balık bunun yerine, paralel park manevrası yaparak avını duyu balonunun içinde tutmuştu. Bu, bir hayvanın vücuduyla duyu sistemleri arasındaki yakın bağlantıların bir başka örneğidir. Etrafını saran elektrik duyusu olmasaydı kara hayalet bıçakbalığının çevikliği pek işe yaramazdı; balık bu kadar çevik olmasaydı bu kez de duyusunun pek bir faydası olmazdı.

Elektrolokasyon çok yönlü doğasından ötürü, şimdiye dek karşılaştığımız tüm duyular arasında belki de en çok dokunmaya benzer.[20] MacIver, "Vücudumuzun her yeriyle dokunmayı algılayabilmeyi tuhaf bulmuyoruz," diyor. "Şimdi bunun kapsamını biraz daha genişlettiğimizi hayal edelim. Galiba elektrik duyusu böyle bir şey. Ama kimbilir balık için nasıl bir şeydir?" Elektrikli balıklar üzerinde çalışan bir başka araştırmacı olan Bruce Carlson'a göre balık, derisinde bir tür basınç hissediyor olabilir. Tıpkı sıcak ve soğuk ya da pürüzlü ve pürüzsüz nesnelere parmaklarımızla dokunduğumuzda olduğu gibi, iletkenlerle yalıtkanlar da bu balıkların derisinde farklı hisler yaratıyor olabilir. "Metal bir topun yanından yüzerek geçersem bir buz parçasının vücudumun bir yanından boylu boyunca geçerken hissettireceğine benzer hafif bir serinlik hissedeceğimi hayal edebiliyorum," diyor Carlson. Spekülasyon elbette ama elektrikli balıklar gerçekten de çevrelerine uzaktan dokunuyormuş gibi davranır. Parmak uçlarımızı bir yüzeyin üzerinde gezdirmemize benzer şekilde, onlar da nesneleri, yanlarında ileri geri hareket ederek inceler. Tanımadığımız şeyleri ellerimizle kavramamız gibi, onlar da vücutlarını gizemli nesnelerin etrafına dolayarak, biçimleri hakkında ipuçları yakalar.[21] Daniel Kish, ekolokasyonu bir tür

dokunma duyusu olarak düşündüğünü söylemişti. Kish, sesi, dokunma duyusunun kapsadığı alanı genişletmek ve etrafındaki dünyayı araştırmak niyetiyle kullanıyor. Elektrikli balıklar da elektrik alanlarını aynı şekilde kullanır.*

Bütün bunlar size ürkütücü derecede tanıdık geliyorsa daha önce söz ettiğimiz gibi balıkların yüzerken etraflarında nasıl akış alanları oluşturduğunu düşünün. Çevrelerindeki nesneler bu akış alanlarını bozar ve balıklar, yanal çizgileriyle bu bozulmaları algılayabilir. Sven Dijkgraaf'ın "uzaktan dokunma" adını verdiği bu durum, balıkların tam olarak elektrolokasyonla yaptığı şeydir; tek fark, su akıntıları yerine elektrik akımları kullanmalarıdır. Bu benzerlik tesadüfi değil. Elektrik duyusu *yanal çizgiden evrildi.*[23] Elektroreseptörler, yanal çizgiyi oluşturan aynı embriyonik dokulardan gelişir ve her iki duyu organı da aynı türden duyusal tüy hücrelerini içerir (ki bunlar iç kulağınızda da bulunur).[24]† Elektrik duyusu aslında dokunmanın, akan su yerine elektrik alanlarını algılamak üzere yeniden tasarlanmış, biraz daha farklı bir biçimidir.‡

Madem yanal çizgi zaten vardı, neden bunun üzerine bir de elektrolokasyon evrildi? Belki de elektrik alanları, neredeyse tüm diğer uyaranlardan daha güvenilir olduğu içindir. Elektrik alanları türbülanstan etkilenmediği için elektrikli balıklar, yanal çizgiyi şaşırtan taşkınların ve girdapların eksik olmadığı, hızlı akan nehirlerde beslenip gelişebilir. Suyun karanlık ya da çamurlu olması elektrik alanlarını engellemez, o nedenle elektrikli balıklar çalkantılı sularda ve geceleri aktif kalabilir. Elektrik alanları, ışık ve koku gibi bariyerlerden de etkilenmez ve bu yüzden elektrikli balıklar, katı nesnelerin arasındaki gizli hazineleri algılayıp tespit edebilir.[25] Aslında bu hayvanlardan saklanmak çok zordur.

---

* Angel Caputi, elektrikli balıklardaki elektrik duyusunun, muhtemelen yanal çizgiyle bir hayvanın kendi bedenine dair farkındalık duyusu olarak tanımlanan propriyosepsiyonu bir araya getirerek bütünleşik bir dokunma duyusu meydana getirdiğini ileri sürmüştür.[22]

† Aynı temel sensörün (kıl hücresinin) sesi, su akışını ve elektrik alanları algılayacak şekilde uyarlanmış olması açıkçası inanılmazdır.

‡ Bu, göründüğü kadar abartılı değildir. Zira yanal çizgideki nöromastlar elektriksel açıdan zaten duyarlıdır ama elektrikli balıklardaki elektroreseptörlerin yüzde biri ila binde biri kadar öyledir.

Yalnızca iletkenliğe (bir cismin akım taşıma yeteneği) değil, kapasitansa (yük depolama yeteneği) da duyarlıdırlar.[26] MacIver'ın söylediğine göre, doğal ortamlarda "kapasitans, canlılığın bir işaretidir." Av hayvanları, görme ve duyma yetilerine güvenen avcıları atlatmak için hareketsiz ya da sessiz kalabilir veya saklanabilir. Ancak hareketsizlik, gizlilik ve sessizlik elektrolokasyon karşısında işe yaramaz. Elektrikli balık için canlı olan her şey, olmayan her şeyin karşısında öne çıkar. En fazla öne çıkanlar da diğer elektrikli balıklardır.

11 Eylül saldırılarından kısa bir süre sonra Eric Fortune, çalıştığı üniversitenin dekanından bir telefon aldı. Fortune'un meslektaşlarından biri Hava Kuvvetleri İhtiyatı (Yedek Güçler) mensubuydu ve göreve çağrılmıştı. Ekvador'da bir tatbikata katılması planlanmıştı ve yerine yeni biri aranıyordu. Görevi, eğer isterse Fortune'a vereceklerdi; o da istedi.

Fortune kendini Amazon yağmur ormanının ortasında, bir öküz boynuzu gölüne* bakan bir kulübede buldu. Bir akşam, yarasalar gölün yüzeyinden böcek toplar, dev örümcekler göl kenarında balık avlarken Fortune iskeleye yürüdü. Amplifikatöre bir elektrot bağlayıp suya indirir indirmez tanıdık bir ses duydu: Cam bıçakbalığı da denen *Eigenmannia*'nın kendine özgü uğultusunu. Fortune, en fazla araştırılmış elektrikli balıklar arasında yer alan cam bıçakbalıkları üzerinde daha önce de çalışmıştı ama laboratuvarında yalnızca yirmi otuz civarında balığı dinlemişti. Oysa iskeledeyken muhtemelen yüzlercesini duyuyordu. Hiçbirini göremiyordu ama ayaklarının altında elektrikli, kıpır kıpır bir dünya olduğunu biliyordu. "Gözlerimi kapadığımda o ânı yeniden yaşıyorum," diyor. "Şimdiye dek yaşadığım en muhteşem deneyimdi ve şu anda orada olamadığıma o kadar üzülüyorum ki."

Biliminsanları onlarca yıldır laboratuvarlarda elektrikli balıklar üzerinde çalışıyorlar.[27] Bu hayvanların deşarjlarını kaydetmek, ufak değişiklikler yapıp kayıtları tekrar çalmak çok kolay olduğundan nörobilim ve hayvan davranışı araştırmalarının temel dayanağı haline gelmiştir.

* Bir akarsuda menderes sapının zamanla incelip kopması sonucunda menderes halkasının oluşturduğu U şeklindeki göl. (*ç.n.*)

Araştırmacılar, örneğin bir balığın hemen yanındaki hareketli bir şeyi taklit eden sinyalleri çalıp balığın nasıl tepki verdiğini izleyebilir. Bunu 1960'lardan beri yapıyor, elektrikli balıklar için sanal gerçeklik âlemleri yaratıyorlar. Ancak yabanıl doğada incelemek zor olduğundan, bu hayvanları gerçek dünyası bizim açımızdan gizemini koruyor.[28] Gerek Afrika filbalıkları gerekse Güney Amerika bıçakbalıkları, gür yağmur ormanlarındaki bulanık nehirlerde, genellikle birbirine dolanmış sualtı bitki örtüsünün ortasında yaşar. Bazı yerlerde kolaylıkla en yaygın balık haline gelirler. Fakat Fortune'un yaptığı gibi suya bir elektrot bırakıp elektrik korosunu işitilebilir seslere dönüştürmediğiniz sürece bunu asla bilemezsiniz.

Bu tür elektrotlar zamanla, yerel bir mağazadan* satın alabileceğiniz basit elektrotlardan, bir sürüdeki her bireyin konumunu belirleyebilen karmaşık ızgara (grid) elektrotlara çeşitlenecek kadar gelişti.[29] Bu cihazlar, balıkların, elektrik alanlarını sadece çevreyi algılamada değil, iletişim kurmak için de kullandığını ortaya çıkardı. Diğer hayvanlar kur yapma, bölgesel savunma ve çatışmaları çözmek için renkleri ya da ötüşleri kullanırken, onlar elektrik sinyallerini kullanır.[30]

Elektrik alanları iletişim için harikadır çünkü seslerden farklı olarak bozulmaya uğramazlar. Engeller tarafından emilmez, yankı yapmazlar. Bir yerden bir yere gitmez, alanı üreten balıkla saptayan balık arasındaki boşlukta ansızın ortaya çıkarlar.† Yani elektrikli balıklar, mesajlarının bozulma riski olmaksızın, enformasyonu deşarjların ayrıntılarına kodlayabilir. İşitmeyle ilgili bölümde zebra ispinozlarının, ötüşlerinin zamansal ince yapısına, yani notaların saniyenin binde biri kadar bir sürede nasıl değiştiğine dikkat ettiğini gördük. Elektrikli balıklar da elektrik deşarjlarıyla aynı şeyi yapar, ancak onlar saniyenin *milyonda* birine duyarlıdır. Enformasyonu basit sinyallere bile sıkıştırabilirler.

---

* "Çalıştığımız alanda bugüne dek yaşanan en büyük talihsizliklerden biri RadioShack'in iflasıydı," diyor Fortune.

† Ortam gürültüsünden pek etkilenmezler; bunun tek istisnası, uzaktaki şimşek fırtınalarının binlerce kilometre yol kateden elektromanyetik dalgalar yaratmasıdır. Bunlar elektrotların kesinkes, elektrikli balıklarınsa muhtemelen saptayabileceği çıtırtılar oluşturur.

Bazı türler, elektrik alanlarını açıp kapatarak davul vuruşları gibi sert ve kesik kesik darbe sinyalleri (elektrik atımları) oluşturur. Bu darbe sinyallerinin biçimi –süresi ve zaman içinde gelişen voltaj değişimleri– hayvanın türü, cinsiyeti, durumu ve bazen de kimliği hakkında bilgi içerir.[31] Kısa zaman ölçeklerinde her birey tekrar tekrar aynı darbe sinyallerini üretir. "Bunu, sesin tınısı olarak düşünmeyi seviyorum," diyor Bruce Carlson. Ne var ki darbe sinyallerinin zamanlaması önemli ölçüde değişebilir. Sinyalin şekli kimlikle ilgili bilgi iletiyorsa *zamanlaması* anlamı iletir. Bir ritim kuş ötüşü kadar çekiciyken, bir başkası hırlama kadar tehditkâr olabilir.[32]

Kara hayalet ve cam bıçakbalıkları gibi türler peş peşe o kadar hızlı darbe sinyalleri üretir ki bunlar kemanla çalınan sonu gelmez bir nota gibi sürekli tek bir dalga oluşturur. Bu dalgaların frekansları türler (ve bazen cinsiyetler) arasında değişir ve balıklar zamanlamayı inanılmaz bir hassasiyetle kontrol eder. Nörobilimci Ted Bullock, bir keresinde kara hayaletin elektrik alanının genellikle her 0,001 saniyede salınım yaptığını ve hata payının sadece 0,00000014 saniye olduğunu gösterdi.[33] Onunkisi, doğadaki en hatasız saatlerden biri olduğu gibi, Bullock'ın aletlerinin neredeyse ölçemeyeceği kadar hassastı.* Dalga tipi elektrikli balıklar, dikkatle kontrol edilen bu sinyallerin frekanslarında çok küçük değişiklikler yaparak mesaj gönderebilir.[35] Mary Hagedorn ve Walter Heiligenberg, bu balıkların sinyal frekansında kısa ve keskin artışlarla "saldırgan karşılaşmalar sırasında kısa ve ani olan ama kur yaparken daha yumuşak ve kısık bir nitelik kazanan cıvıltılar" üretebildiğini yazmıştı.[36†]

Bu tür mesajlar fazla uzağa taşınmaz ama elektrikle iletişim (elektrokomünikasyon), aktif elektrolokasyona göre mesafeyle daha az sınırlıdır. Bir balık elektrolokasyon yaparken ancak daha güçlü bir elektrik alanı üreterek duyu menzilini artırabilir ve bu da bir noktadan sonra

---

* Howard Hughes *Sensory Exotica*'da, kara hayalet bıçakbalığının elektrik alanına göre ayarlanan bir saatin her yıl sadece bir saat geri kalacağını yazmıştı.[34]

† Elektrik deşarjlarının frekansları birbirine yakın iki *Eigenmannia* karşılaşırsa sinyal frekanslarını değiştirirler.[37] Frekans karışmasından kaçınma tepkisi [*jamming avoidance response*] olarak adlandırılan bu durum, bir omurgalıda bugüne dek en ayrıntılı incelenmiş davranışlardan biridir.

çok fazla enerji harcamayı gerektirir. Oysa bir başka balığın elektrik sinyallerini "dinlerken" bir alan yaratması gerekmez. Yalnızca daha duyarlı elektroreseptörlere gereksinimi vardır ve bunlar kolay evrilir. Bir balık, vücudundan sadece birkaç santimetre uzaktaki avı hissedebilir ama bir başka elektrikli balığın sinyallerini birkaç metre öteden ya da daha uzaktan saptayabilir. Kendi türü, Malcolm MacIver'ın hayal ettiği algısal sisin içinde parlar.

Elektrikle iletişim, filbalıklarının bir grubu olan, bu beceriyi uç noktalara taşımış mormirinler (*Mormyrinae* alt ailesi) için özellikle önemlidir. Tüm filbalıklarında "knollenorgan" denen, son derece duyarlı ve benzersiz bir elektroreseptör çeşidi bulunur; bu organ elektrolokasyon için kullanılmaz ve yalnızca diğer balıklardan gelen elektrik sinyallerini algılar. Mormirinler bu özel reseptörleri daha da değiştirip elektrik sinyallerinin diğer filbalıkları tarafından fark edilemeyecek özelliklerini saptayabilir hale getirmiştir.[38] Bu farklılıkları keşfeden Bruce Carlson'a göre, mormirinler âdeta bir tür elektriksel renkli görme özelliğine sahipken, diğer filbalıkları tek renkte takılıp kalmıştır.

Carlson, balıkların sosyal yaşamlarındaki bir farklılaşmanın bu değişimleri tetiklediğinden şüpheleniyor.[39] Daha basit "knollenorgan"lara sahip filbalıkları açık denizde, büyük sürüler halinde yaşar. Diğerlerinin etrafta olup olmadıklarını ve kendilerinin nerede bulunduğunu bilmeleri yeterlidir. Oysa mormirinler, karanlık nehirlerin dibinde, çoğunlukla yalnız yaşayan teritoryal balıklardır. "Bir başka balığı tespit ederlerse onun tam olarak nerede olduğunu ve *kim* olduğunu bilmek isterler," diyor Carlson. "Olası bir rakip mi? Eş adayı mı? Önemsiz başka bir tür mü?" Diğerlerinin kim olduğunu bilme gereksinimleri, onların elektriksel duyusunu farklılaştırdığı gibi, evrimlerinin seyrini en az iki önemli yoldan değiştirmiştir.

Öncelikle, mormirinler çok çeşitlidir. Birbirlerinin elektrik sinyallerindeki en ufak değişiklikleri algılayabildikleri için cinsel tercihlerini bu anlık oynamalara göre yapabilirler. Bu tercihler, tek bir balık popülasyonunun, her biri kendi elektrik eğilimine ve eşleşen sinyallere sahip iki gruba hızla bölünmesine neden olabilir. Cinsel seçilim olarak adlandırılan bu süreç mormirinlerde hızlı viteste çalışır. Bu balıklar, elektrik sinyallerini diğer filbalıklarına göre 10 kat hızlı çeşitlendirmiş

olduğundan, başka gruplarda görülenin 3 ila 5 katı oranında yeni türler ortaya çıkmıştır. Günümüzde, diğer filbalıklarının içerdiği yaklaşık 30 türe karşılık, en az 175 mormirin türü var. Duyusal hassasiyet, biçimsel çeşitliliği doğurmuştur.

İkincisi, belki kısmen güçlendirilmiş "knollenorgan"larının saptadığı enformasyonu işlemek için mormirinlerde karmaşık bir beyin yapısı evrildi. Ubangi filbalığı (ya da Peter'ın fil burunlu balığı) denen türün beyni, vücut ağırlığının yüzde 3'ünü oluşturur ve aldığı oksijenin yüzde 60'ını kullanır.[40*] "İnsan, böyle bir beyinle kaleler inşa ettiklerini, senfoniler bestelediklerini düşünüyor," diyor, bu balıklar üzerinde çalışan Nate Sawtell. "Böyle bir şeyle karşılaşmadık ama onlara baktığınızda Japon balıkları gibi olmadıklarını anlarsınız. Kurnaz ve uyanıktırlar."

New York'taki laboratuvarında yaşayan bir grup Ubangi filbalığını görmem için beni oraya götürüyor. Bu uzun, kahverengi ve yassı balıkların kuyrukları çatallı, yüzleriyse "schnauzenorgan" olarak adlandırılan, hareketli bir uzantıyla sonlanıyor. Onlara bu yüzden filbalığı deniyor ama bu uzantı aslında burun değil çene; yani onu Pinokyo gibi değil de bir firavun gibi düşünün. Karşılaştığım diğer elektrikli balıklar sakin ve bu dünyadan değilmiş gibiydi, oysa bunlar çok hareketli ve asabi görünüyorlar.† Sawtell'in suya daldırdığı elektrodu *inceliyorlar*. Elektroreseptörlerden zengin "schnauzenorgan"larıyla tankın kumlu zeminini araştırıyorlar.[42] Bazen iki balık, birinin kuyruğundaki elektrik

---

* Bir kıyaslama yapmak gerekirse beynimiz vücut ağırlığımızın yaklaşık yüzde 2-2,5'ini oluşturur ve oksijenimizin yüzde 20'sini alır. Farklı boyutlardaki hayvanlar ya da sıcakkanlı hayvanlarla soğukkanlı olanlar arasında bu oranlar doğrudan karşılaştırılamaz. Zekâ da sadece beyin büyüklüğüyle ölçülemez. Yine de filbalıklarının beyinleri alışılmadık ölçüde büyüktür.

† Carlson bir mormirid türünün [*Mormyrops anguilloides, Cornish jack*] sürüler halinde avlandığını gösterdi.[41] "Laboratuvarda ikisini aynı tanka koysaydık en az biri, hatta büyük olasılıkla ikisi birden ölürdü," diyor çünkü ölümüne kavgaya tutuşurlardı. Fakat Malawi Gölü'nde (elektrikli balıkların yaşadığı, dibi görünecek denli berrak olan az sayıda habitattan birinde) bulunan bu mormiridler geceleri ortaya çıkar, akranlarıyla toplanıp daha küçük balıkların peşine düşerler. Yeniden bir araya geldiklerinde çoğunlukla ani patlamalar şeklinde elektrik darbeleri üretirler ki bu, birbirlerini karşılıklı kabul ettiklerini gösteren ve sürüyü bir arada tutan bir sinyal olabilir.

organı diğerinin başındaki elektroreseptörlerle yan yana gelecek şekilde duruyor. Sonra da birbirinin kulağına bağırarak düet yapan iki kişi gibi çılgınca vızıldamaya başlıyorlar. Birbirlerini kovalıyorlar. Âdeta oyun oynuyorlar.*

Bu balıkları seyrederken, elektrik sinyalleriyle yönetilen bir sosyal hayatın nasıl olması gerektiğini merak ediyorum. Bu hayvanlar birbirlerinden saklanamaz. Çevrelerini algılamak için elektrik deşarjı yaparken, varlıklarını ve kimliklerini menzillerindeki diğer elektrikli balıklara duyurmaları kaçınılmazdır. Elektrikli balıklarla dolu bir nehir, ağzı doluyken bile hiç kimsenin *asla* susmadığı bir kokteyl partisine benziyor olmalı.

Beni asıl şaşırtansa şu: Balıklar aynı elektrik deşarjlarını hem yön bulma hem de iletişim için kullanıyor. Diğer balıklara sinyal göndermek için ürettikleri elektrik alanları, elektrolokasyon yaparken kullandıkları alanların aynısıdır. Bu basit gerçek, balığın mesaj iletmek için alanını değiştirdiğinde, kendi yön bulma veya yiyecek arama yetilerini de değiştirmek zorunda olduğu anlamına gelir. Örneğin kavgayı kaybeden elektrikli balıklar, genellikle boyun eğme işareti olarak elektrik darbelerine kısa süreliğine ara verir; ancak bu, aynı zamanda çevrelerine dair farkındalıklarını da geçici olarak durdurur. Bu balıklarda iletişim algılamayı değiştirir. Bir kuşun ötüşünü dinlerken, söylediği her şeyi duymasanız bile *bir şey* söylediğinden emin olabilirsiniz. Ama bir elektrikli balığı, diğerinin yanında vızıldarken duyduğunuzda, balık mesaj göndermeye mi çalışıyordur yoksa diğer hayvanın nerede olduğunu anlamaya ya da ikisini birden yapmaya mı? Dahası, yön bulmayla iletişim arasındaki ayrım balıklar için önemli midir?

"Yaşamlarının daha zengin yönleri, bilişsel tarafları hakkında, evcil kediniz ya da köpeğinizle ilgili bildiğiniz kadar çok şey bilmiyoruz," diyor Sawtell. Onlarca yıllık çalışmanın ardından biliminsanları, elektrikli balıkların sinir sistemi hakkında, diğer çoğu hayvan için olduğundan fazlasını biliyor. Elektrik duyusunu yönlendiren nöral devrelerin

* Bruce Carlson büyük filbalıklarını tanklarındaki borularla oynarken gördüğünü anlatıyor. "Birinin içine girip onu yüzeye kaldırıyor ve düşene kadar boruyu dengede tutmaya çalışıyorlardı," diyor. "Sonra gidip aynı şeyi tekrar yapıyorlardı."

ayrıntılı haritalarını çizebildikleri halde bu duyu, yine de başka bir dünyadanmış gibi görünür. Ve öyle olmasına rağmen şaşırtıcı derecede yaygındır.

1678'de İtalyan fizikçi Stefano Lorenzini elektrikli vatozun yüzünde, her biri jelle dolu birer tüpe açılan binlerce gözenek olduğunu fark etti. Diğer vatozlar ve yakın akrabaları köpekbalıklarında da benzer gözenekler ve tüpler vardı. Bu yapılar daha sonra Lorenzini ampulleri olarak adlandırıldı ama ne Lorenzini ne de çağdaşları bunların ne işe yaradığını biliyordu. Yüzyıllar içinde ipuçları yavaş yavaş birikti. Daha iyi mikroskoplar her tüpün, ampul denen şişkin bir odacıkla sonlandığını ve her odacığın bir sinire bağlandığını ortaya çıkardı (bu yapıyı, dibindeki sapıyla uzun bir balkabağı gibi düşünebilirsiniz). Bunlar duyu organları olmalıydı ama algıladıkları neydi? 1960'ta biyolog R. W. Murray nihayet bu ampullerin elektrik alanlarına tepki verdiğini gösterdi.[43] Birkaç yıl sonra Sven Dijkgraaf ile öğrencisi Adrianus Kalmijn, onun bu görüşünü doğruladı.[44] İkili, elektrik alanlarına maruz kalan köpekbalıklarının refleks olarak göz kırptığını ama Lorenzini ampullerindeki sinirler kesildiğinde böyle olmadığını gösterdi. Uzun balkabağı şeklindeki yapılar elektroreseptörlerdi.*

Üç yüzyıllık gizemin yanıt bulması yalnızca daha fazla soru doğurmuştu. Hans Lissmann zayıf elektrikli balıkların, kendi elektrik alanlarını algılayarak yön bulduğunu 1960'larda göstermişti. Ama köpekbalıkları ve vatozlar muhtemelen elektrolokasyon yapamıyorlardı çünkü elektrikli vatoz dışında hiçbiri elektrik üretmiyordu. Öyleyse neden elektroreseptörleri vardı?

Sonunda anlaşıldığı üzere *tüm* canlılar suya daldırıldığında elektrik alanı üretir.[46] Hayvan hücrelerinin tuzlu sıvıyla dolu torbalar olduğunu unutmayın. Bu sıvıların derişimi çevredeki suyun derişiminden farklı

* Lorenzini ampulünün içindeki jel son derece iletkendir.[45] Çevredeki suyun elektrik alanını ampulün dibindeki duyu hücreleri tabakasına ileten bir kablo gibi davranır. Duyu hücreleri, bu özellikleri hayvanın kendi vücudunun özellikleriyle karşılaştırıp bu enformasyonu beyne iletir. Köpekbalığı, binlerce ampuldeki duyu hücrelerinden gelen sinyalleri bir araya getirerek etrafında bir elektrik alanı duyusu oluşturabilir.

olduğu için hücre zarında bir voltaj oluşturur. Yüklü atomlar olan iyonlar zardan geçerken bir akım yaratır. Bu temel düzenek pildekiyle aynıdır; yüklü parçacıklar, bir bariyerle ayrılmış iki tuz çözeltisi arasında hareket ederken akım oluşturur. Yani hayvan bedenleri, yalnızca var olma eylemiyle dahi biyoelektrik alanlar üreten canlı pillerdir. Bu alanlar, zayıf elektrikli balıkların ürettiği alanlardan bile binlerce kat zayıftır; deri ve kabuk gibi yalıtkan örtülerden ötürü daha da zayıflarlar.[47] Ancak ağız, solungaç, anüs ve (köpekbalıkları için önemli olan) yaralar gibi vücudun açıkta kalan belirli bölgelerinde tespit edilebilecek kadar güçlüdürler. Köpekbalıkları ve vatozlar, diğer duyuları yanılsa bile avlarını bulmak için dosdoğru bu alanlara yönelebilir.*

Kalmijn 1971'de bunun doğru olduğunu kanıtladı.[48] Küçük benekli kedi köpekbalığının, kuma gömülmüş lezzetli pisibalıklarını, kokuları ve mekanik ipuçlarını geçirmeyen agardan yapılmış odacıklara koyulmuş olsalar bile lezzetli pisibalıklarını tespit edebildiğini gösterdi. Ancak köpekbalıkları, üzerine yalıtkan bir plastik örtü örtülmüş pisibalıklarını tespit edemiyordu. Kalmijn pisibalıklarını alıp onların yerine kuma gömülü elektrotlar kullanarak balığın zayıf elektrik alanlarını taklit ettiğinde, köpekbalıkları "alanın kaynağını inatla kazmış ve elektrotlara rastladığında tekrar tekrar tepki vermişti." Doğal ortamlarında yaşayan köpekbalıkları da gömülü elektrotları ısırır.[49] Bazıları bunu doğdukları andan itibaren yapar.[50]

Köpekbalığının elektrik duyusu pasif elektroresepsiyon olarak adlandırılır;[51] bu duyu, şimdiye kadar gördüklerimizden farklıdır. Köpekbalıkları ve vatozlar, çevrelerindeki nesnelerin yerlerini saptamak için aktif olarak kendi elektrik alanlarını üretmez, diğer hayvanların –çoğunlukla da avlarının– elektrik alanlarını pasif olarak saptarlar.† Bu işte olağanüstü, hatta belki hiçbir hayvan grubunun olamadığı kadar

* Köpekbalıkları ve vatozların, kas hareketlerinin ürettiği elektrik alanları saptadığı söylenir. Ancak bu tür hareketler gerçekten de elektrik alanları üretmekle birlikte, elektroreseptörlerin saptayabileceği aralığın altında kalır.

† Gerçi her zaman öyle olmaz. Bazı dikenli vatozlar, kuma gömülü eşlerini ararken elektrik alanlarından faydalanır.[52] Bazı köpekbalığı embriyoları, yanından geçen yırtıcıların elektrik alanlarını saptayınca donakalır;[53] bu özellik, bana Karen Warkentin'ın ağaç kurbağalarını hatırlatıyor.

iyidirler.* Stephen Kajiura, küçük bir çekiçkafa türünün, suyun içinde bir santimetre mesafeden sadece bir nanovoltluk –bir voltun *milyarda biri*– bir elektrik alanını saptayabildiğini gösterdi.† Ne var ki bir köpekbalığının elektrik duyusu sadece kısa menzilli iş görür.[54] Kuma gömülü bir balığı (ya da elektrodu) okyanusun ötesinden, hatta bir havuzun diğer ucundan bile algılayamaz. Bir köpekbalığı millerce öteden yiyeceğin kokusunu alır.[55] Yaklaştıkça görme duyusu devreye girer. Daha da yaklaştıkça sürece yanal çizgiler katılır. Elektrik duyusu yalnızca son aşamada, avın yerini kesin olarak belirleyip saldırıya geçeceği an işin içine girer. O nedenle Lorenzini ampulleri genellikle ağız çevresinde yoğunlaşmıştır.‡

Pasif elektroresepsiyon, özellikle saklanmış avı bulmada işe yarar. Ne de olsa hayvanlar kendi doğal elektrik alanlarını kapatamazlar.§ Ama bir köpekbalığı diğer duyularına bel bağlayamıyorsa –sözgelimi, Kalmijn'in deneyinde olduğu gibi avı kuma gömülüyse– Lorenzini ampulleri hedefe yeterince yaklaşıncaya dek hayvanın etrafta dönüp durması gerekir. Bazı türlerde kafanın büyümesi bu arayışı

---

* Teknik olarak, yeterince güçlüyse elektriği insanlar bile algılayabilir. Elektriği algılayan özel duyu organlarımız yoktur. Ama güçlü akımlar sinirlerimizi ayrım göz etmeksizin uyararak karıncalanmaya, ağrıya ve seğirmeye neden olur. O zaman bile ancak 0,1-1 volt/cm şiddetindeki elektrik alanlarını hissedebiliriz. Köpekbalıkları bizden yaklaşık bir milyar kat daha hassas olduğundan bu onlar için berbat bir tecrübeye dönüşmez.

† Normal bir AA pil ile zayıf bir alan oluşturmak için pilin uçlarını Atlantik'in iyi yakasına daldırılmış elektrotlara bağlamak gerektiği söylenir. Bu metafor bir çağrışım yapmakla beraber tamamen uygunsuz bir ölçek hissi veriyor. Gerçekte köpekbalıkları bir pilin elektrik alanından çok daha zayıf elektrik alanların peşindedir ve bu alanlar mesafe arttıkça daha da zayıflar; o nedenle köpekbalığının elektrik duyusu kısa menzillidir.

‡ Elektrik alanları da aynı nedenle, Dijkgraaf ve Kalmijn'in gördüğü göz kırpma refleksini tetikler: Köpekbalıkları bu refleksle, olası bir saldırıya karşı gözlerini korur.[56]

§ Buna karşılık alanlarının voltajını düşürebilirler. Mürekkepbalıkları, köpekbalığının karaltısını görünce hareket etmeyi bırakır, nefesini tutar ve solungaç boşluklarını kapatır.[57] Christine Bedore, bu önlemlerin elektrik alanlarının voltajını yüzde 90'a yakın oranda ve ısırılma riskini yarı yarıya azalttığını gösterdi. Mürekkepbalıkları, elektrik alanlarını hissedemeyen yengeçlerin tehdidi karşısında bu davranışı sergilemez.

hızlandırmıştır. Çekiçkafalı köpekbalıklarında konik bir burun yerine, bagaj rüzgârlığına benzeyen geniş, yassı bir kafa bulunur.[58] "Çekiçlerinin" altı Lorenzini ampulleriyle doludur ve köpekbalığı, metal dedektörü gibi kullandığı bu reseptörlerle deniz tabanını tarayarak gömülü, yemeye uygun hazineleri arar. Elektriksel açıdan diğer köpekbalıklarından daha hassas olmamalarına rağmen kafaları belirli bir sürede daha geniş bir alanı taramalarına olanak tanır.

Testerebalıkları da bunu yapabilir. Bu hayvanlar aslında vatozlar grubunda yer almalarına rağmen vücutları daha çok köpekbalığına, kafalarıysa ortaçağ silahlarına benzer. Hayvanın burnu, her iki taraftan acımasız dişlerin çıktığı uzun, yassı bir bıçakla sonlanır. Bu "testere", sahibinin vücut uzunluğunun üçte biri kadardır ve tepeden tırnağa ampullerle doludur. Testere, hayvanın elektriksel farkındalık alanını öne doğu büyük ölçüde genişletir ki bu, bulanık sularda faydalı bir özelliktir.[59] Testerebalıklarını araştıran Barbara Wueringer, "Teknemizin pervanesini bile göremediğimiz nehirlerde onlarla karşılaşıyoruz," diyor. Wueringer, testerenin hem sensör hem de silah olarak iki işlevi olduğunu gösterdi.[60] Balıklar testerenin üzerinde yüzerken testerebalığı, yan dişlerini avına saplar, hayvanı sersemletip ikiye böler. Yaralı balık dibe inerken testerebalığı, testeresinin alt kısmıyla avını bulup mıhlar. "Onları ne zaman görsem hep aynı şeyi düşünürüm: 'Bu nasıl olabilir?'" diyor Wueringer.*

Elektrik alanlarını saptama yetisi köpekbalıkları ve vatozlara özgü değildir.[62] Her altı omurgalı türünden biri bu duyuya sahiptir.[63] Çene yerine dişli vantuzları olan, yılan görünümlü taşemenler; 1930'larda canlı örnekleri bulunana dek soyunun tükendiği düşünülen tarihöncesi balıklar olan koelakantlar; testerebalıklarının testeresi gibi elektroreseptör zengini uzun burunlarını avlarını bulmak için kullanan kaşık ağızlı mersin balıkları gibi tarihöncesinden kalma diğer balık grupları; hem kendi hem de başka canlıların elektrik alanlarını hissedebilen bıçakbalıkları ve

* Wueringer, testerebalıklarını ve akrabalarını kurtarmak amacıyla Sharks and Rays Australia adlı bir dernek kurdu.[61] Bu hayvanları elektroresepsiyon ustalarına dönüştüren testereler aynı zamanda önemli bir av ganimetidir ve ağlara kolayca takılır. Beş türün hepsinin nesli tehlikede, hatta üçünün nesli kritik tehlikededir.

filbalıkları; elektrikli balıkları avlayan binlerce yayınbalığı türü; ayrıca semenderler ve solucana benzeyen ayaksızlar gibi amfibiler bu listeye dahildir.

Bazı memelilerin bile elektrik duyusu vardır.* En az bir yunus türü –Güney Amerika kıyılarında yaşayan Guyana yunusu– bu yetiye sahiptir;[64] gerçi zaten ekolokasyon yapabiliyorken hepi topu 8-14 elektroreseptörün ne faydasını gördüğünü hayal etmek zor. Benzer şekilde, Avustralya'da yaşayan ve iri kirpilere benzeyen ekidnanın da burnunun ucundaki elektroreseptörleri nasıl kullandığı tam olarak bilinmiyor.[65] Belki de bunlarla nemli toprakta hareket eden küçük böcekleri algılıyordur. Ekidnanın yakın akrabası olan ornitorengin ördeğinkine benzeyen meşhur gagasında 50 binden fazla elektroreseptör bulunur.[66] Yiyecek aramak için daldığında, gagasını çekiçkafalı köpekbalığı gibi iki yana çılgınca sallar. Suyun altında gözleri, kulakları ve burun delikleri kapalıdır; sadece dokunma ve elektrik duyularına güvenir.

Elektroreseptörlü bu geniş mahlukat tayfası bize üç önemli şey söylüyor.[67] Bunlardan ilki, elektrik duyusunun kadim bir duyu olduğudur. Elektroreseptörler ilk olarak çok uzun zaman önce yanal çizgiden evrildi ve yaşayan bütün omurgalıların ortak atası, elektrik alanlarını belki de algılıyordu. Biz elektrik duyusuna sahip değiliz ama soyağacımızda 600 milyon yıl geriye gidersek atalarımızın bunu yaptığı neredeyse kesindir. İkincisi, omurgalılar evrimsel tarihleri boyunca elektrik duyusunu en az dört kez *kaybetmiştir*; bu nedenle asalak balıkta [*hagfish*], kurbağalarda, sürüngenlerde, kuşlarda, memelilerin hemen hemen hiçbirinde ve balıkların çoğunda bu duyu bulunmaz.† Üçüncüsü, ornitorenkler, ekidnalar, Guyana yunusları ve elektrikli balıklar gibi elektrik duyusunu kaybetmiş birçok omurgalı grubu, atalarında bulunan ama

* Yıldız burunlu köstebeklerin elektrik duyusuna sahip olduğunu iddia eden bir makale yayımlandı. Ancak yıldız burunlu köstebek üzerinde ilk kez çalışırken, hayvanın elektrik duyusu olup olmadığını araştıran Ken Catania buna dair delil bulamadığını söylüyor.

† Elektroresepsiyon suyun altında saklanan avı bulmakta böylesine yararlı olduğu halde, niye bu kadar çok canlının bu duyuyu kaybettiğini kimse bilmiyor. Bruce Carlson kulağına gelen iyi bir varsayım bile olmadığını ve bunun "Esrarengiz bir durum" olduğunu söylüyor.

akrabalarında bulunmayan bu yetiyi yeniden kazanmıştır.* Bıçakbalıkları ve filbalıkları bu açıdan özeldir.[68] Dünyanın zıt uçlarında yaşayan bu canlılarda, önce diğer balıkların elektrik alanlarını pasif olarak saptayan; daha sonra, hayvanın kendi ürettiği elektrik alanlarını aktif olarak algılayan ve son olarak, diğer elektrikli balıkların alanlarını saptayan üç çeşit elektroreseptör birbirinden bağımsız olarak arka arkaya evrildi.† Bu iki grubun tarihi, iki farklı canlı grubunun yaşam partisinde kazara aynı kıyafetle ortaya çıktığı yakınsak evrimin harikulade bir örneğidir.

Elektrik duyusunun karmaşık tarihi aynı zamanda elektroreseptörler hakkında özel bir şeyin de ipuçlarını veriyor. Beynin dili elektriktir ve gördüğümüz gibi hayvanlar ışığı, sesi, kokuları ve diğer uyaranları elektrik sinyallerine dönüştürmek için tuhaf yollar geliştirmek zorunda kalmışlardır. Ancak elektroreseptörler sadece elektriği elektriğe çevirir. Düşüncelerimize güç veren enerjiyi algılayan tek duyu organı elektroreseptördür. Bir elektroreseptör geliştirmek belki o kadar da zor değildir ve omurgalıların evrim ağacına tekrar tekrar girip çıkmalarının nedeni belki de budur.

Görünüşe göre elektroreseptörlerin önemli bir sınırlaması var: Yalnızca iletken bir ortama daldırıldığında çalışmaları. Su tam da böyle bir ortamdır ve şu ana kadar karşılaştığımız, elektroreseptör kullanan hayvanların hemen hepsinin suda yaşayan canlılar olması tesadüf değildir.‡ Havaysa tersine, sudan 20 milyar kat yüksek bir dirence sahip bir yalıtkandır.[70] Bu nedenle biliminsanları uzun zamandan beri elektrik duyusunun karada işe yaramayacağını varsayıyordu.

Derken Daniel Robert arılarla müthiş bir deney yaptı.

---

* Bu grupların her birinde kendine has elektroreseptörler ortaya çıktı (sadece köpekbalıklarıyla vatozlardaki elektroreseptörler Lorenzini'nin adıyla anılır). Ancak bu organlar gösterdikleri çeşitliliğe rağmen aynı temel yapıyı paylaşır. Hemen her zaman, yüzeydeki bir gözenek, tabanında duyu hücreleri bulunan jelle dolu bir odacığa açılır. Bu yapılar çoğu zaman yanal çizgiden köken alır. Ama Guyana yunusunun elektroreseptörleri, artık bıyık içermeyen ve iletken jelle dolu bıyık çukurlarından gelişmiştir.

† Bunlar aşağı yukarı aynı zamanda oldu. Her iki balık grubunda da 110-120 milyon yıl önce pasif elektroreseptörler ve bundan 15-20 milyon yıl sonra aktif elektroreseptörler gelişti.[69]

‡ Ekidnalar bir istisnadır ama yine de elektroreseptörlerini muhtemelen nemli toprağa daldırmaları gerekir.

***

Dünyada her gün 40 bin civarında gök gürültülü fırtına kopar. Bunlar Dünya atmosferini topluca dev bir elektrik devresine dönüştürür. Yıldırım düştüğünde elektrik yükü yukarı doğru hareket eder; böylece üst atmosfer pozitif, gezegenin yüzeyi negatif yüklenir. Bu, gökten yere uzanan güçlü bir elektrik alanı olarak tanımlanan atmosferik potansiyel gradyanıdır.[71] Sakin ve güneşli günlerde bile havanın voltajı yerden yükseldikçe metre başına yaklaşık 100 volt artar. Ne zaman bu konu hakkında yazsam mutlaka birileri çıkıp basım hatası yaptığımı söyler ama sizi temin ederim ki hata değil: Gerçekten de kapınızın önünde *en az* 100 volt/metrelik bir gradyan var.

Yaşam, gezegenin elektrik alanı içinde var olur ve ondan etkilenir. Çiçekler suyla dolu oldukları için elektriksel olarak topraklanır ve yeşerdikleri toprakla aynı negatif yükü taşır. Arılarsa muhtemelen toz ve diğer parçacıklarla çarpıştıklarında vücut yüzeyinden elektronların kopması nedeniyle uçarken pozitif yüklenir. Pozitif yüklü arılar negatif yüklü çiçeklere konduğunda havada kıvılcımlar uçuşmaz ama polenler uçuşur. Zıt yüklerin çektiği polen tanecikleri, daha çiçeğe konmadan arının üzerine zıplar.[72] Bu olay yıllar önce tanımlandı. Fakat Daniel Robert konu hakkında okurken, arılarla çiçeklerin elektriksel dünyasında bundan çok daha fazlası olması gerektiğini fark etti. (Robert'la işitme duyusuyla ilgili bölümde, *Ormia* sineği üzerine yaptığı çalışmalar nedeniyle tanışmıştık.)

Çiçekler negatif yüklü olmalarına karşılık pozitif yüklü havada büyür. Bu özellikleri, çevrelerindeki elektrik alanlarını büyük ölçüde güçlendirir ve bu etki özellikle yaprak uçları, taç yapraklarının kenarları, tepecik (stigma) ve başçık (anter) gibi uçlarda ve kenarlarda belirgindir. Biçimine ve büyüklüğüne göre her çiçek kendine özgü bir elektrik alanıyla çevrilidir. Robert bu alanlar üzerinde düşünürken aklına aniden "Arılar bunu biliyor mu?" sorusunun geldiğini hatırlıyor. "Ve bu sorunun yanıtı, evetti."

Robert ve meslektaşları 2013'te, elektrik alanlarını kontrol edebildikleri yapay "e-çiçekler" kullanarak arılarla bir deney yaptılar.[73] Elektriksel olarak yüklü bir e-çiçeği tatlı nektara, yüksüz olanıysa acı bir sıvıya buladılar. Bunun haricinde sahte çiçekler özdeşti ama arılar sadece elektriksel ipuçlarını kullanarak ikisini ayırt etmeyi çabucak

öğrendi. Hatta biri taç yapraklarının üzerinde düzenli voltaj dağılımı gösteren, diğeri hedef tahtası şeklinde olan farklı biçimde elektrik alanlarına sahip çiçekleri bile ayırt edebiliyorlardı.* Bu örüntüler yapaydı elbette ama gerçek çiçeklerin elektrik alanları da benzer örüntüler gösterir. Robert'ın ekibi yüksükotları, petunyalar ve jerberaların üzerine yüklü, renkli tozlar püskürterek bu örüntüleri görünür hale getirdi. Taç yaprakların kenarlarında biriken tozlar görünür olmayan örüntülerin sınırlarını görünür kıldı. Çiçekler, görebildiğimiz canlı renklerinin (ve göremediğimiz ultraviyole renklerin) yanı sıra, elektrik haleleriyle sarılıdır. Bombus arıları bu alanları algılayabilir. "Arıların bize ne anlattığını anlayınca sevinçten havalara uçtuk," diyor Robert.†

Bombus arılarında Lorenzini ampulleri bulunmaz. Elektroreseptörleri, onları böylesine sevimli kılan minik kıllarıdır.[75] Hava akımlarına duyarlı kılların yön değiştirmesi sinir sinyallerini başlatır. Fakat çiçeklerin çevresindeki elektrik alanları da onları hareket ettirecek kadar güçlüdür. Elektrikli balıklardan ya da köpekbalıklarından çok farklı olmalarına rağmen arılar da görünüşe göre genişletilmiş bir dokunma duyusuyla elektrik alanlarını saptar. Üstelik arıların bunu yapabilen yegâne karasal hayvan olmadığı hemen hemen kesindir. Altıncı Bölüm'de gördüğümüz gibi, birçok böcek, örümcek ve diğer eklembacaklılar dokunmaya duyarlı kıllarla kaplıdır. Bu kıllar elektrik alanlarının etkisiyle de yön değiştirebiliyorsa ki Robert öyle olduğundan şüpheleniyor, o zaman elektrik duyuları karada, sudakine göre çok daha yaygın olabilir.

Elektroresepsiyonun havada yaygın olma ihtimali akla şaşırtıcı sonuçlar getirir.[76] Tozlaşmayı düşünün. Acaba çiçekler, özellikle çekici elektriksel desenler üretecek şekilde mi evrildi? Balarıları, ünlü sallanma dansını yaparak

---

* Ayrıca arılar elektriksel ipuçları varsa benzer renkteki çiçekleri daha çabuk ayırt etmeyi öğrendiler.[74]

† Hamamböcekleri, sinekler ve diğer böceklerin elektrik alanlarına tepki verebildiği zaten gösterilmişti ama bu deneyler doğal elektrik alanlarından çok daha güçlü alanlar kullanılarak yapılmıştı. O nedenle sonuçlar fazla öğretici değil. İnsanlar bile aşırı güçlü elektrik alanlarını saptayabilir çünkü saçları havaya dikilir. Robert'ın çalışması önemliydi çünkü Bombus arılarının biyolojik açıdan uygun güçte elektrik alanlarını tespit ettiğini, bu bilgiyi nektar toplayacakları yeri seçme gibi anlamlı gerçek davranışlarda kılavuz olarak kullanabildiğini ve hedef tahtası örüntüsü gibi küçük ipuçlarını algıladıklarını gösteriyordu.

birbirlerine besin kaynağı hakkında bilgi verir, kovanda dans eden arkadaşlarının ürettiği elektrik alanlarını hissedebilirler; bu alanlar dansa başka bir anlam katmanı ekler mi? Çiçeği ziyaret eden bir arı, onun elektrik alanını geçici olarak değiştirir; bu, diğer arılara çiçeğin yakın zamanda ziyaret edildiğini ve nektarının tükenmiş olduğunu söylüyor olabilir mi? Çiçekler, alışverişe açık olduklarını belirtmek için elektrik alanlarını çabucak sıfırlayarak arılara yalan söyleyebilir mi? Atmosferin potansiyel gradyanının güneşli günlere göre 10 kat güçlü olabildiği yağmurlu ve sisli havalarda çiçekler farklı mı hisseder? "Biz hissetmiyoruz," diyor Robert, "peki ya onlar?"

Ya diğer eklembacaklılar? Atmosferdeki elektrik alanlarında en güçlü distorsiyonu bitkilerin uzuvları yaratır ama onların üzerinde yaşayan birçok böcekte de dikenler, kıllar ve garip uzantılar bulunur. Bunlar yaklaşan tehditlerin elektriksel yüklerini saptayan duyargalar olabilir mi? Ya da elektriksel duyarlılığı olan yırtıcılar açısından, ay güvesinin uzun kanat kuyruğu gibi, bu böceklerin görünümünü değiştiren birer tuzak olabilirler mi? Bu soruların hepsinin yanıtı hayır olabilir ama ya birkaçının yanıtı evetse? Zayıf hava akımları, titreşim sinyalleri ve bizim farkına bile varmadığımız diğer uyaranlarla dolu olan böcek dünyasının hayal ettiğimizden çok daha zengin olması gerektiğini zaten görmüştük. Şimdi bu karışıma elektrik alanlarını da eklemeliyiz. Robert'ın, Bombus arılarıyla yaptığı deneylerden sadece beş yıl sonra, bir başka tanıdık eklembacaklı grubunda elektroresepsiyona dair delil bulması anlamlı. Robert, örümceklerin Dünya'nın elektrik alanını hissedebildiğini ve kullanabildiğini gösterdi.

Birçok örümcek uzun yol katetmek için "balon yöntemi"ni kullanır. Ayak uçlarına basıp karnını yukarı doğru kaldıran örümcek ağ ipliği salar ve havalanır. Havada süzülerek kilometrelerce gidebilir. Genellikle ağ ipliğinin rüzgârı yakalayıp örümceği de peşinden çektiği söylenir ama örümcekler sakin havalarda da balon yöntemini başarıyla kullanır.* Robert'ın meslektaşı Erica Morley 2018'de daha iyi bir açıklama

* Rüzgâr açıklaması mantıklı değil çünkü örümceklerin çoğu ipeği karnından fırlatmaz. İpeğin dışarıdan çekilmesi gerekir. Örümcekler normalde bunu ayaklarını kullanarak ya da ipeği bir yüzeye tutturarak yapar. Fakat balon yöntemini kullanan örümcekler ikisini de yapmaz ve hafif esintilerin bu iplikleri dışarı çekebilecek kadar güçlü olması pek olası değil. Ama elektrostatik kuvvetler yeterince güçlüdür.

buldu.[77] Örümcek ipeği, örümceğin vücudundan çıkarken negatif yüklenir ve hayvanın bulunduğu bitkinin negatif yükleri tarafından itilir. Bu kuvvet, çok küçük olmasına rağmen, örümceği havaya kaldırmaya yeter. Bitkilerin çevresindeki elektrik alanlar uçlarda ve kenarlarda en güçlü olduğundan, örümcekler ince dallardan ve otların kenarlarından balon yöntemiyle kuvvetli bir kalkış yapabilir. Morley, laboratuvarında ot yerine karton şeritler kullandı. Sonra da örümcekleri, dışarıdakileri taklit eden yapay elektrik alanlarına maruz bıraktı. Bu alanlar örümceklerin bacaklarındaki duyu tüylerini dalgalandırınca hayvanlar karakteristik olarak parmak ucu duruşuna geçip ipek salgılamaya başladı. Bazıları, en hafif esintiyle bile havalanmayı başardı. "Onları ayakları yerden kesilirken görebiliyordum," diyor Morley, "ve elektrik alanını açıp kapadığımda yukarı aşağı hareket ediyorlardı."

Bu deneyler sayesinde Morley çok eski bir fikrin doğru olduğunu kanıtladı. 1828'de başka bir biliminsanı örümceklerin elektrostatik kuvvetlerle hareket edebildiğini ileri sürmüştü ama rüzgârla hareket etme görüşünü tercih eden (ve bu konuda upuzun bir mektup yazan) bir rakibi, onun bu düşüncesini dikkate almadı.[78] Sonuçta rakibi kazandı ve elektrostatik kuvvet fikri iki yüzyıl boyunca gözden düştü.[79] "Rüzgâr fiziksel olarak somuttur," diyor Robert. "İnsanlar onu hissedebiliyordu. Elektriğinse tarifi daha zordu."

Hâlâ öyle. Robert deniyor ama elektrik duyuları üzerinde çalışmak hâlâ zor. Bombus arıları ve örümceklerle ilgili çalışmaları böcek ve araknid dünyası hakkında düşünme biçimini değiştirmiş. Kendi bahçesinde, yüklü bir akrilik çubuğu yaklaştırdığında yavru uğurböceklerinin yere düştüğünü fark etmiş. Uğurböceği larvalarının sırtında minik püsküller bulunur; Robert bunların, yaklaşan bir yırtıcının elektrik yükünü algılayıp algılamadığını merak ediyor. Şimdi bununla uğraşıyor; yeni titreşim şarkıları arayan Rex Cocroft'u anımsatırcasına, arka bahçesini yeniden tasavvur ediyor. Ancak Cocroft titreşimleri kolayca işitilebilir seslere dönüştürebildiği halde, Robert aynısını elektrik alanları için yapamıyor. Bu alanları görüntüleyebilecek bir kamera yok. Onları tarif etmek için kullanılabilecek zengin bir kelime dağarcığı da yok. *Akım*, *voltaj* ve *potansiyel* sözcükleri *tatlı*, *kırmızı* ve *yumuşak* sıfatlarının taşıdığı çağrışım gücüne sahip değil. "Kendimi bir böceğin yerine koymam

ve neler olduğunu hayal etmem çok zor," diyor. "Bu, yeni bir bilim dalı. Ama göz ardı edilebileceğini sanmıyorum."

Elektrik duyusu Robert'ın hayal gücünü genişletebilir ama hiç değilse bazı böceklerde bu duyunun var olduğunu biliyor. Diğerlerinin aynı duyuyla neler yapabileceğini tahmin ederek o tepkileri sınamaya yönelik deneyler tasarlayabilir. Muhtemel reseptörlerin hangileri olduğunu ve nasıl çalışabileceğini biliyor. Bunların hepsi önemli nimetlerdir ve hafife alınmaması gerekir. Ne de olsa bu kadar şanslı olmayan akademisyenlerin araştırdığı başka bir duyu daha var.

11.

Onlar Yolu Bilir

Manyetik Alanlar

Güneş battıktan, el ayak çekildikten sonra Eric Warrant'la birlikte, Avustralya'nın Karlı Dağlar bölgesinde koruma altında bir alan olan Kosciuszko Ulusal Parkı'na doğru yola çıkıyoruz. Kangurular ve vombatlar dışarıda ama çok daha küçük faunanın arayışında olduğumuz için onlarla ilgilenmiyoruz. Deniz seviyesinden 1600 metre yüksekte, sessiz sakin bir yere park ediyoruz. Ben ellerimi sıcak çay fincanıyla ısıtırken, Warrant iki ağacın arasına beyaz bir çarşaf geriyor. Çarşafı, Sauron'un Gözü olarak adlandırdığı devasa bir ışıkla alttan aydınlatıyor. Çarşafın köşelerine, ultraviyole ışığıyla böcekleri çeken daha küçük iki lamba asıyor. Tepemizde avlanan yarasaların ekolokasyon çağrılarını duyduğumuz için etrafta sürüsüne bereket böcek olduğunu biliyoruz. Az sonra büyük bir böceğin çarşafa küt diye çarptığını duyuyoruz. Böcek çimenlerin arasına düşüyor; Warrant da kendini yere atıp büyük bir mutlulukla böceği yakalıyor. Elindeki plastik kavanozu kaldırarak, "Evet, bu kesinlikle bir bogong," diyor. Kavanozda iki buçuk santimetre uzunluğunda, ağaç gövdesi renginde, sıradan bir güve var. Dışarıdan bakıldığında, bu yaratığın Warrant'ı niye bu kadar memnun ettiğini anlamak zor.

"Pek de ahım şahım görünmüyor," diyorum.

"Haklısın," diyor Warrant kıkırdayarak, "gizli yeteneklerinin sırrı da bu."

Kavanozdaki güve, bahsedilen yeteneklerini ima edercesine var gücüyle kanat çırpıyordu. Yakalanan böceklerin çoğu sakin durur ama

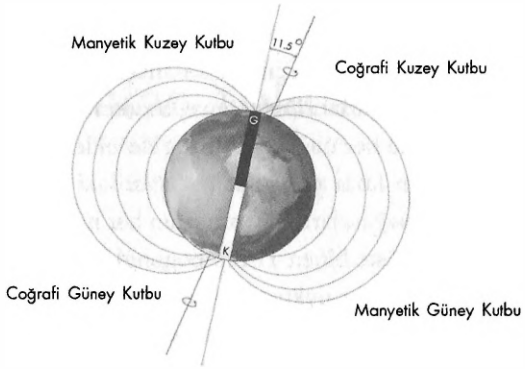
görünüşe göre manik bir enerjinin ele geçirdiği bu güve başka bir yerde olmak için karşı konulmaz bir istek duyuyor. "Çok da uçarı," diyor Warrant. "Gideceği yerler var."

Her bahar, milyarlarca bogong, Avustralya'nın güney doğusundaki kurak ovalarda pupalarından çıkar.[1] Kavurucu yaz sıcağı yaklaşırken daha serin diyarlara kaçarlar. Daha önce, bırakın göç etmeyi, bir kere bile uçmadıkları halde her nasılsa nereye gideceklerini bilirler. Dokuz yüz elli kilometreden fazla yol katedip dağlardaki güzide birkaç mağaraya varırlar. Bu mağaraların duvarlarının her metrekaresi, kanatları balık pulları gibi üst üste binen 17 bin bogongla kaplı olabilir. Bu güvenli ve serin ortamda yaz uykusuna yatan güveler sonbaharda dönüş yolculuğuna çıkar. Warrant, Sauron'un Gözü'yle onları yakalamaya çıktığı bazı geceler, "kelimenin tam anlamıyla binlerce güveye boğulduğunu" söylüyor.

Bogong dışında, bu kadar belli bir adrese gitmek için bu denli uzun göç yolculuğu yaptığını bildiğimiz tek böcek, Kuzey Amerika'daki kral kelebeğidir. Fakat kral kelebekleri, gündüz vakti güneşi pusula gibi kullanarak yön bulur; oysa bogonglar yalnız geceleri uçar. O halde doğru yönü nereden bilirler? Karlı Dağlar'da büyümüş ve çocukluğundan beri yerel böceklere tutkun olan Warrant öteden beri bu sorunun yanıtını bulmak istiyordu. İlkin, güvelerin hassas gözleriyle yıldızları gözlemliyor olabileceğini düşünmüştü. Bu konuda haklıydı ama yakaladığı bogongları gözlemlediği ilk gece, güvelerin gökyüzünü göremeseler de doğru yöne uçabildiğini fark etti ve Dünya'nın manyetik alanını algılıyor olmaları gerektiğini anladı.[2]

Dünya'nın çekirdeğini katı demirden bir küreyle bunun etrafını saran ergimiş demir ve nikel oluşturur. Bu sıvının çalkantılı hareketleri bütün gezegeni dev bir çubuk mıknatısa dönüştürür. Dünya'nın manyetik alanını, ders kitaplarında gördüğümüz gibi betimleyebiliriz: Güney kutbu yakınından çıkan çizgiler yerkürenin etrafında kıvrılıp kuzey kutbundan girer. Bu jeomanyetik alan her zaman vardır. Gün içinde ya da mevsimden mevsime değişmez. Hava koşullarından ya da fiziksel engellerden etkilenmez. O yüzden, yerini ve yönünü bulmaya çalışan yolcular için her zaman kullanabilecekleri bir nimettir. İnsanlar binlerce yıl boyunca pusula kullanarak yönlerini buldular. Deniz kaplumbağaları,

dikenli ıstakozlar, ötücü kuşlar ve diğer birçok hayvan da milyonlarca yıldır bunu yapıyor, hem de hiç yardımsız.



Manyetik algılama (manyetoresepsiyon) olarak bilinen bu yeti, hayvanların, bulutların ya da karanlığın gök cisimlerini örttüğü ya da büyük nirengi noktalarının siste kaybolduğu ve gökyüzü ile okyanusların yol gösteren kokulardan yoksun olduğu zamanlarda bile yön bulmalarını sağlar.[3] Warrant'ın, kıymetli bogonglarının manyetik algılama kulübünün üyesi olduğunu öğrendiğinde böyle olağanüstü bir duyu üzerinde çalışacağı için heyecanlanmış olacağını düşünebilirsiniz. Ama Warrant şakayla karışık, "Manyetik duyunun bogong için önemli olduğunu anladığımda şöyle düşündüm: Hayır, olamaz," diyor.

Manyetik algılama ilgili araştırmalar kıyasıya rekabet ve kafa karıştırıcı hatalarla kirletilmiştir; duyunun kendisi de hem üzerinde çalışılması hem de anlaşılması zor bir konudur. Tüm duyularda yanıt bekleyen sorular var ama araştırmacılar görme ya da koku duyularının, hatta elektroresepsiyonun hiç değilse nasıl çalıştığını ve hangi duyu organlarının işe karıştığını az çok biliyorlar. Bunların hiçbiri manyetik algılama için geçerli değil. Manyetik algılama, varlığı yıllarca önce doğrulandığı halde hakkında en az şey bildiğimiz bir duyu.

Jeomanyetik alan bütün gezegeni sarar ve kıtalararası yolculuklarında hayvanların kılavuzu olur. Fakat en destansı yolculuklar bile birkaç tereddütlü adımla başlamalıdır ve manyetik algılama da ilk olarak böyle adımlarla keşfedildi.

Kuşlar göç zamanı geldiğinde görünür biçimde huzursuzlanır. Esaret altında bile hoplar, oradan oraya uçar, çırpınırlar. Bu telaşlı hareketler, Almancada "göç huzursuzluğu" anlamına gelen *Zugunruhe* adıyla bilinir. Kuşlar göç vaktinin geldiğini bilir. Gitme arzusuyla yanıp tutuşurlar. Dahası, Alman ornitolog Friedrich Merkel'in 1950'lerde anladığı gibi, izleyecekleri yolu bilirler. Merkel ve öğrencileri Hans Fromme ile Wolfgang Wiltschko, sonbaharda yakaladıkları kızılgerdanların göç huzursuzluğunun tesadüfi olmadığını fark etmişlerdi.[4*] Kızılgerdanlar geceleri güney batıya doğru zıplayıp duruyordu; bu, kafeste olmasalardı onları güneşli İspanya'ya götürecek olan yöndü. Gece gökyüzünü görebildikleri açık havada böyle yapıyorlardı ama nirengi noktası olan gök cisimlerini göremeyecekleri, dört bir tarafı kapalı odalarda da aynı yöne gitmeye çalışıyorlardı. Bu, Warrant'ın elli yıl sonra bogonglarda gözlemleyeceği örüntünün aynısıydı. 1950'lerde Merkel'in ekibi de aynı aydınlanmayı yaşamıştı: Kuşlar başka bir ipucu kullanıyor olmalıydı ve jeomanyetik alan bir olasılıktı.

Manyetik algılama fikri yeni değildi. Zoolog Alexander von Middendor 1859'da kuşların ("havada seyrüsefer eden o denizciler") "içsel bir manyetik hissi" olabileceğini öne sürmüştü.[5] Fakat yüzyıl boyunca ne o ne de bir başkası, tuhaf görünen bu fikri destekleyecek herhangi bir veri elde edebildi. Sıradışı hayvan duyularının yabancısı olmayan Donald Griffin bile kanıt olmadığı için şüpheci yaklaşıyordu.[6] 1944'te, yani *ekolokasyon* terimini kullandığı yıl, manyetik duyunun "hiç muhtemel olmadığı"nı yazmıştı. Kavramın ciddiye alınmaya değer olmasının tek sebebi, göçmen kuşların, nereye gideceklerini nasıl bilebildiklerini yeterince iyi açıklayabilecek başka hiçbir şeyin olmamasıydı. Manyetik algılama, daha iyisi olmadığı için var olmaya devam eden bir fikirdi. Delile ihtiyacı olan bir varsayımdı.

Merkel ve Wiltschko o delilleri elde ettiler.[7†] Önce kızılgerdanları, her duvarında bir tünek olan sekizgen bir odaya yerleştirip zıpladıkları

---

* Avrupa kızılgerdanı, Amerikalıların kızılgerdan [*robin*] olarak adlandırdığı kuştan tamamen farklıdır. Her ikisinin de göğsü kızıldır ama ikincisi, adını ilkinden alan orta boy bir ardıç kuşuyken, Avrupa kızılgerdanı küçük bir sinekkapandır.

† Yaklaşık aynı dönemde diğer araştırmacılar yassısolucanlar ve çamur salyangozları gibi basit hayvanların da manyetik alanlara tepki verebildiğini gösterdiler.[8]

yönü kaydettiler. Kuşlardan biri tüneğe her zıpladığında, ağırlığa hassas bir düğme harekete geçiyor ve kuşun hareketlerini kâğıt şeridin üzerine delik açarak kaydediyordu. Ekip sonrasında daha basit ama daha etkili bir yöntem kullandı. Kuşları, tabanında bir ıstampa ve yanlarında kurutma kâğıdı olan bir huniye yerleştirdiler. Sonra da kuşların dışarı atlamaya çalışırken kâğıt üzerinde bıraktığı mürekkepli ayak izlerini saydılar.* Bunlar, kuşların sadece *Zugunruhe* döneminde olduğu dar bir zaman aralığında yapılabilen bezdirici deneylerdi. Ama onlar sayesinde kızılgerdanların sonbaharda güneybatıya doğru yola çıktığına dair açık nicel deliller elde edildi. Wiltschko, kuşların manyetik duyularıyla hareket ettiğini doğrulamak için çevrelerindeki manyetik alanı çevirdi. 1960'larda kafesleri –aralarında yapay manyetik alan oluşan bir çift kangaldan yapılmış– Helmholtz bobinlerinin ortasına koymaya başladı. Wiltschko bobinleri kullanarak kızılgerdanların etrafındaki alanları döndürünce kuşlar zıplamalarının yönünü buna uyacak şekilde değiştirdi. İçsel bir biyolojik pusulaları vardı.

Bu deneyler haklı bir gerekçeden ötürü hâlâ şüpheyle karşılanıyordu. Dünya'nın manyetik alanı son derece zayıftır.[9] O kadar zayıftır ki bir hayvanın moleküllerinin rasgele, titrek hareketleri *200 milyar kat* daha fazla enerji taşıyabilir. Hiçbir canlı bu derece zayıf bir uyaranı algılayamamalı. Ama kızılgerdanların algılayabildiği gayet açık.† Üstelik bu konuda benzersiz değiller. Wiltschko ile eşi Roswitha ve başka biliminsanları kızılgerdanlarla yapılan ilk deneyleri, boz ötleğen, çivit çintesi, ak gerdanlı ötleğen, karabaş ötleğen, çalıkuşu ve gri sırtlı gözlükçü gibi başka kuşlarla da tekrarladılar.[10] Middendor'un hayal ettiği "içsel manyetik his" gerçek olduğu gibi, *yaygındı* da.

Merkel'in kızılgerdanlarının ilk öncü adımları atmasından bu yana, biliminsanları hayvanlar âleminde manyetik algılamaya dair deliller

---

* Bu düzeneğe, yaratıcısı Steve Emlen'dan dolayı Emlen hunisi adı verilmiştir. Ucuz ve kullanımı kolay olan düzenek, kuş göçüyle ilgili çalışmalarda devrim yarattı. Günümüzde hâlâ kullanılmaktadır, sadece ıstampayla kurutma kâğıdının yerini Tipp-Ex kâğıdı ya da ısıtıldığında renk değiştiren termal kâğıt almıştır.

† Laboratuvar deneylerinde, tecrübe ettikleri manyetik alanın yönündeki 5 derecelik sapmaları tespit edebilirler. Doğal ortamlarında, hapsedilmekten ötürü strese girmedikleri için muhtemelen daha da hassastırlar.

buldular.[11] Ancak şimdiye dek karşılaştığımız tüm diğer duyulardan farklı olarak bu duyu iletişim amacıyla kullanılmaz. Hayvanlar manyetik alan üretmezler ve bu türden saptayabildikleri tek alan, Dünya'nın manyetik alanıdır. Bunu çoğunlukla kısa ya da uzun mesafe seyrüseferde kullanırlar. Büyük kahverengi yarasalar, böcek yakalamakla geçen yoğun bir gecenin ardından pusula duyusunu kullanarak yuvalarına dönerler.[12] Yaşamlarının ilk dönemi açık denizde geçen bebek kardinal balıkları, dünyaya geldikleri mercan resiflerine dönmek için pusula duyusunu kullanır.[13] Tüysüz köstebek fareleri pusulaları yardımıyla karanlık yeraltı tünellerinde yollarını bulurlar.[14] Bogong güveleriyse Warrant'ın bulduğu gibi, pusulalarını Avustralya aşırı uçuşlarda yön bulmak için kullanır.[15]

Bu hayvanların çoğu, Wiltschko'ların klasik deneyinin bir tür çeşitlemesine tabi tutulmuştur: Hayvanı boş bir alana bırak, çevresindeki manyetik alanı değiştir ve farklı bir yöne doğru hareket edip etmediğine bak. Kızılgerdan ya da güve boyutlarındaki bir hayvanla bunu yapmak mümkün. "Bir balinayla bunu yapamazsınız," diyor biyofizikçi Jesse Granger. "Ama gezegendeki en akıl almaz göçlerden bazılarını balinalarda görürüz. Bazı balinalar neredeyse ekvatordan kutuplara kadar gider; üstelik her yıl tam da aynı yere şaşmaz bir isabetle varırlar." Onların da manyetik duyusu olduğunu düşünmemek elde değil.

Bunun doğru olup olmadığını anlamak için Granger yanıtı güneşin kendisinde aradı.[16] Güneş dönemsel kozmik öfke nöbetleri geçirerek, Dünya'nın manyetik alanını etkileyen, radyasyon ve yüklü parçacık akışının oluşturduğu güneş fırtınaları yaratır. Bu tür fırtınalarda, manyetik duyarlılığı olan balinaların pusulaları önemli ölçüde şaşabilir ve sahil şeridine yakın olduklarında, küçük bir navigasyon hatası bile karaya vurmalarına yol açabilir. Granger, bu fikri sınamak için açıklanamayan sebeplerle karaya vurmuş olan sağlıklı, yaralanmamış gri balinaların 33 yıllık kayıtlarını derledi. Bu olayların zamanlamasını, gökbilimci meslektaşı Lucianne Walkowicz'in tartıştığı güneş etkinliği verileriyle karşılaştırdı. Ortaya çıkan örüntü çarpıcıydı: Güneş fırtınalarının en yoğun olduğu günlerde gri balinaların karaya vurma olasılığı dört kat daha fazlaydı.*

* Kızılgerdanlar da güneş fırtınasını taklit eden yapay manyetik alanlarla rotalarından saptırılabilir.[17]

Bu bağıntı balinaların pusulaya sahip olduğunu kanıtlamasa da öyle olduğunu kuvvetle ima eder. Dahası, manyetik algılamanın müthiş doğasını yansıtır. Gezegenin ergimiş metal katmanının kuvvetleriyle fırtınalı bir yıldızdan serbest kalan kuvvetlerin çarpıştığı bu duyu, gezgin bir hayvanın zihnini etkileyerek yolunu başarılı bir şekilde mi bulacağını yoksa sonsuza dek mi kaybedeceğini belirler.

Pek az göç deniz kaplumbağalarınınki kadar güvenilmez ve uzundur.[18] Bir kumsala gömülü yumurtadan çıkan yavru kaplumbağa, okyanusa doğru beceriksizce emeklerken, yengeç kıskaçları ve kuş gagalarının toplu saldırısına göğüs germek zorundadır. Suya girdikten sonra, yukarıdaki deniz kuşlarına ve aşağıdaki yırtıcı balıklara kolayca yakalanabileceği sığlıklardan kaçmalıdır. Biraz olsun güvende olabilmek için bir an önce açık okyanusa ulaşmalıdır. Florida'da yumurtadan çıkan bir kaplumbağa için bunun anlamı, Kuzey Atlantik dairesel döngüsüne (Kuzey Amerika ile Avrupa arasındaki okyanusta saat yönünde dönen akıntı) ulaşana dek yüzmektir. Yavru 5-10 yıl bu döngüde kalıp, yüzen yosun öbekleri arasında saklanarak yavaş yavaş büyür. Çok yavaş olan gelişimini Atlantik'te tamamlayıp Kuzey Amerika sularına döndüğünde artık sadece en büyük köpekbalıklarına karşı savunmasızdır.*

Tecrübesiz deniz kaplumbağalarının bu denli uzun göç yolculuklarının nasıl üstesinden gelebildikleri 1990'lara dek bilinmiyordu.[19] Müteveffa Archie Carr bu cehalet döneminin "bilime hakaret" olduğunu söylemişti. Başlangıçta Ken Lohmann, bu telaşın sebebini anlayamamıştı. Yeni tamamladığı doktora eğitimi ve gençliğin verdiği kibirle donanmış Lohmann'a göre yanıtı apaçıktı: Kaplumbağalar manyetik pusula kullanıyor olmalıydı. Kendi manyetik bobinlerini yapıp kaplumbağa yavrularını, kızılgerdanlarla yapılmış klasik deneydekine benzer bir ortama koymak basit bir işti. İki yıllık bir projeye imza atarken, "Asıl endişem ikinci yıl ne yapacağımdı," diye anlatıyor o günleri. "Bu, 30 yıldan uzun bir zaman önceydi. Tek bir konuda haklıydım; kaplumbağaların manyetik duyusu olduğu konusunda." Lohmann aslında iki duyuları olduğunun farkına varmamıştı.

* On bin yavrudan sadece birinin bu aşamaya gelebildiği tahmin ediliyor.

Lohmann'ın şüphelendiği ve 1991'de gösterdiği gibi deniz kaplumbağalarının pusulası vardır.[20] Fakat sahip oldukları diğer manyetik duyu daha da etkileyicidir. Jeomanyetik alanın iki özelliğine dayanır. Bunlardan biri olan *eğim* (inklinasyon), jeomanyetik alan çizgilerinin Dünya'nın yüzeyiyle yaptığı açı olarak tanımlanır. Ekvatorda bu çizgiler yere paralel, manyetik kutuplardaysa diktir. İkinci özellik olan *şiddet*, jeomanyetik alanın kuvvetindeki farklılıklar şeklinde tanımlanır. Jeomanyetik alanın eğimi de şiddeti de yerkürenin farklı yerlerinde değişir ve okyanusta çoğu noktada bu ikisinin benzersiz bir bileşimi bulunur. Bunlar, enlem ve boylam gibi koordinatlar oluşturur. Jeomanyetik alanın bir okyanus haritası gibi işlev görmesini sağlar ve Lohmann'ın da bulduğu gibi, denizkaplumbağaları bu haritayı okuyabilir.

1990'ların ortalarında eşi Catherine'le birlikte, esaret altındaki *Caretta Caretta* yavrularını Atlantik'tekine benzer bir manyetik tura çıkardılar.[21] Onları, uzun rotaları üzerinde çeşitli yerlerde tecrübe edecekleri eğim ve şiddette manyetik alanlara maruz bıraktılar. Şaşırtıcı biçimde, kaplumbağalar her bir noktada ne yapacaklarını biliyor, dairesel döngünün içinde kalmalarını sağlayacak yönlere yüzüyorlardı. Bu ancak kaplumbağalara ne tarafa gideceklerini söyleyen bir pusula ve nerede olduklarını söyleyen bir haritalarının olması halinde mümkündü. Uygun yerlerde yön değiştirmeleri ancak iki duyuyla birden mümkün olabilirdi.*

Kaplumbağaların yetileri doğuştan geldiği için özellikle etkileyicidir.[23] Lohmann'lar yumurtadan yeni çıkmış kaplumbağaları toplayıp tek bir gece esaret altında ve sadece bir kez teste tabi tuttular. Dolayısıyla bu yavrular, manyetik sinyalleri yorumlamayı başka kaplumbağalardan öğrenmiş olamazlardı. Daha önce hiç okyanusta bulunmamışlardı. Manyetik haritaları genetik olarak kodlanmış olmalıydı. Lohmann, kaplumbağaların, hissettikleri manyetik referanslarla çapraz karşılaştırma yapabilecekleri, bütün Atlantik'in eksiksiz bir zihinsel atlasıyla doğmuş

* Son 83 milyon yılda jeomanyetik alan 183 kere tersine döndü. Manyetik kuzey manyetik güneye (ya da tam tersi) dönüştü. Bu dönüşümler muhtemelen binlerce yıl içinde ortaya çıkar; o nedenle herhangi bir kaplumbağayı rotasından çıkarması olası değildir. Fakat her kaplumbağa türü evrimsel tarihi boyunca pek çok kez manyetik kutup değişimi yaşamış ve manyetik haritaları buna göre uyarlanmış olmalı.[22]

olduklarına pek ihtimal vermiyor. Onun yerine muhtemelen manyetik alanın belirli eğim ve şiddet birleşimlerinde devreye giren birkaç içgüdüye bağlı hareket ediyorlar. *Manyetik alan şöyle hissettiriyorsa doğuya git, böyle hissettiriyorsa güneye git.* "Kaplumbağanın gerçekte nerede olduğuna dair bir fikrinin olması gerekmez. Çok fazla bilgiye ihtiyaç duymadan oldukça karmaşık bir göç rotası boyunca yüzebilir," diyor Lohmann. "Ama elbette, bir kaplumbağanın kafasının içinde neler olup bittiğinin bilmenin bir yolu yok."

Kuzey Atlantik'teki göç yolculuğunu sağ salim atlatan *Caretta Caretta*lar, sonunda Florida'ya geri dönüp yerleşir.[24] Yaşlandıkça ve öğrendikçe manyetik haritaları daha da zenginleşir. Lohmann'lar daha yaşlı olan bu kaplumbağaları yakalayıp Florida kıyı şeridinin farklı yerlerindeki manyetik alanlara maruz bıraktıklarında, hayvanlar hep kendilerini eve götürecek yönde yüzüyorlardı. Sadece yavruyken kullandıkları seyrek yol işaretlerine güvenmekle kalmıyor, görünüşe göre, yuvalandıkları suların manyetik topografyasını daha ayrıntılı biliyorlardı.

Manyetik haritaların önemli kısıtlılığı var: Bir kaplumbağa belirli bir konumdayken, hemen etrafındaki manyetik alanın özelliklerini hissedebilir ama *ötedeki* alanın neye benzediğini bilemez. Bunu yapabilmek için hareket etmesi gerekir. Dahası, muhtemelen uzun mesafeler katetmesi gerekir çünkü özellikle kısa mesafelerde manyetik enformasyon doğru değildir. Manyetik duyuyu Avrupa'dan Afrika'ya gitmek için kullanabilirsiniz ama yatak odanızdan tuvalete gitmek için kullanamazsınız. O yüzden, harita duyusuna sahip olduğuna inandığımız türlerin çoğu, onu uzun mesafe yolculuklarda kullanır.*

Bazı ötücü kuşlar, tıpkı yavru deniz kaplumbağaları gibi, göç rotaları üzerindeki manyetik yol işaretlerini tanır. Benekli bülbüller her

* Basit görünen hayvanlar bile manyetik haritalardan faydalanır. Karayip dikenli ıstakozları, mercan kayalıklarındaki yuvalarda yaşar ama yiyecek aramak için uzaklara giderler. Restoran tabaklarına düşmedikleri sürece genellikle yuvalarına geri dönerler. Lohmann, Florida Keys'te yakaladığı ıstakozları, 23 mil uzaktaki bir deniz laboratuvarına götürerek ve yol boyunca kafalarını karıştırmak için mümkün her şeyi yaparak bunu gösterdi.[25] Gözlerini bağladığı hayvanları koyu renk plastik kutulara kapattı. Üzerlerine sallanan mıknatıslar astı. Hatta aracı aklına estiği gibi sürdü. Buna rağmen ıstakozlar serbest bırakılınca tam da onları yuvalarına götürecek yönde yürüdüler.

kış Avrupa'dan Afrika'nın güneyine giderken, uçsuz bucaksız Sahra Çölü'nü aşmak zorundadır.[26] Kuzey Mısır'ın manyetik alanını algılayınca, kendilerini bekleyen çetin çöl yolculuğuna hazırlanmak için yağ depolamaya başlarlar. Diğer göçmen ötücü kuşlar da güçlü rüzgârlarla savruldukları ya da meraklı biliminsanları tarafından rotalarından saptırıldıkları zaman bu haritaları kullanarak yönlerini ayarlayabilir. Örneğin saz kamışçınları ilkbaharda normalde kuzeydoğuya göç eder ama Nikita Chernetsov'un yüzlerce kilometre doğuya götürdüğü saz kamışçınları yönlerini kuzeybatıya çevirmişti.[27]

Ayrıca somon balıkları, deniz kaplumbağaları ve Atlantik yelkovanları (bir tür deniz kuşu) gibi birçok hayvan, ergin çağa ulaştığında doğduğu yeri tekrar bulabilmek için oranın manyetik imzasını belleğinin derinliklerine işler.[28] Deniz kaplumbağaları belleklerindeki bu izler sayesinde, yumurtadan çıktıkları kumsallara geri dönüp yumurtalarını bırakabilirler.[29] Esrarengiz bir şekilde hiç hata yapmazlar. Ascension Adası'nda yuva yapan yeşil deniz kaplumbağaları, Brezilya'ya gidiş-dönüş 1200 mil yol katettikten sonra Atlantik'in ortasındaki aynı minicik kara parçasını bulabilirler.[30] "Doğduğu yere dönme" içgüdüsü o kadar güçlüdür ki kaplumbağalar yanı başlarında mükemmel bir seçenek olmasına rağmen doğdukları kumsala dönmek için yüzlerce mil yüzer.* Bunun sebebi belki de iyi yuva alanları bulmanın zor olmasıdır. Yuva alanlarına sudan erişilebilmesi gerekir. Kum taneleri oksijen geçişine izin verecek kadar iri olmalıdır. Kaplumbağaların cinsiyetini yumurtaların sıcak ya da soğuk olması belirlediğinden, ortamın tamı tamına doğru sıcaklıkta olması gerekir. Lohmann'a göre, "Bir kaplumbağa şunu söyleyebilir: Dünyada işe yaradığını bildiğim tek yer, kendi geliştiğim kumsal." Yıllarca denizde kalan kaplumbağa, o çok güvendiği kreşin yerini manyetik haritası sayesinde yeniden bulabilir.

* Jeomanyetik alan yıldan yıla çok az değişir ve bu, kaplumbağaların yuva yaptığı kumsalların manyetik imzalarını etkiler. Lohmann, bitişik kumsalların imzalarının bir noktada buluştuğu yıllarda, yuva yapan kaplumbağaların bir araya toplandıklarını buldu. İmzaların birbirinden uzaklaştığı yıllarda kaplumbağalar yayılır. Ancak bu küçük değişkenlikler, hayvanları rotalarından saptıracak kadar önemli değildir.[31]

Sözde iki yıl sürecek plan projesinin üzerinden yıllar geçmiş olmasına rağmen Lohmann hâlâ kaplumbağalar üzerinde çalışıyor.* Onların yön bulma becerileri konusunda ne kadar çok şey öğrenmiş olursa olsun hâlâ öğreneceği çok şey var. Bir manyetik koordinatlar kümesini ne kadar çabuk öğrenebiliyorlar? Beyinleri eğimi ve şiddeti nasıl temsil ediyor? Hatta kaplumbağalar (ya da diğer hayvanlar) manyetik alanları nasıl algılıyorlar? Lohmann'a bu can sıkıcı sorular hakkında bir fikri olup olmadığını soruyorum. İçtenlikle gülüyor. "Fikir çok, delil az," diyor. "Önünde sonunca çözüleceği konusunda iyimserim; ömrüm vefa eder ya etmez, orasını bilemem."

Duyu organlarını bulmak genellikle zor değildir. Görevleri, hayvanın çevresinden uyaranları toplamak olduğu ve uyaranların çoğu hayvanın dokularından geçerken bozulduğu için, duyu organları hemen her zaman ya doğrudan dış ortama açık ya da gözbebeği veya burun delikleri gibi bir açıklık yoluyla dış ortamla bağlantılıdır. Böyle açıklıklar önemli ipuçları olabilir. Biliminsanları, çıngıraklıyılanın çukurlarının, köpekbalığının Lorenzini ampullerinin ve balığın yanal çizgisinin duyu organları olduğunu, neyi algıladıklarını bulmadan çok önce anlamışlardı. Fakat manyetik algılama üzerinde çalışan araştırmacıların elinde böyle ipuçları yok. Manyetik alanlar, biyolojik maddeden engellemeye uğramaksızın geçebilir. O nedenle bu alanları saptayan hücreler –manyetik reseptörler– hayvanın her yerinde bulunabilir. Bunlar, gözbebekleri ya da çukurlar gibi açıklıklara ya da mercek veya kulak sayvanı gibi odaklayıcı yapılara gereksinim duymaz. Hayvanın başında, ayak parmaklarında ya da tepeden tırnağa herhangi bir yerinde bulunabilirler. Etinin içine gömülü olabilirler. Hatta vücudun farklı kısımlarına dağılmış, duyu organları oluşturmamış bile olabilirler. Çevrelerinden dokudan ayırt edilemeyebilirler. Onları bulmaya çalışmak, Sönke Johnsen'in ifadesiyle "samanlıkta iğne aramaya" benzeyebilir.[32]

* Kuzey Carolina'nın Raleigh şehrindeki laboratuvarını ziyaret ettiğimde, eylülde toplanmış ve ertesi yıl haziranda serbest bırakılacak 16 *Caretta Caretta* yavrusuna bakıyordu. Toplanan kaplumbağalara her yıl farklı bir temaya göre isim veriliyor ve bu yılın teması makarnalar. Lazanya, Ziti (düdük makarna), Bowtie (fiyonk makarna) ve favorim olan Tortellini tanklarında yüzüyorlardı.

Ben bu kitabı yazarken, manyetik algılama, bilinen bir sensörü olmayan tek duyu olmaya devam ediyor.[33] Manyetik reseptörler "Duyu biyolojisinin kutsal kâsesidir," diyor Eric Warrant. "Hatta onları bulan, Nobel Ödülü bile alabilir." Araştırmacılar, manyetik reseptörlerin kimliği ve nerelerde olabileceğine ilişkin birçok önemli ipucuyla birlikte yanlış ipuçları da topladılar. Bu reseptörlerin ne hatta nerede olduklarını kesin olarak bilmeden, nasıl çalışabileceklerini bilmek son derece zordur. Ancak bu konuda üç makul fikir var.

İlki, manyetit adıyla bilinen manyetik demirle ilgilidir.[34] Biliminsanları 1970'lerde, bazı bakterilerin hücre içinde uzun manyetit kristalleri oluşturarak kendilerini canlı pusula iğnelerine dönüştürebildiğini buldular.[35] Bu mikroplar çalkalandığında ya kuzeye ya da güneye doğru yüzme eğilimi gösterir. Hayvanlar da teorik olarak kendi manyetit pusulalarını yapabilirler. Bir duyu hücresine bağlı bir manyetit iğne düşünün. Hayvan döndükçe iğne tutunduğu yere asılır. Hücre bu gerilimi kaydeder ve bir sinir sinyali başlatır. Böylece hücreler soyut bir manyetik uyaranı daha somut fiziksel bir "çekiştirmeye" dönüştürebilir. "Bence bu son derece makul bir fikir," diyor Warrant, "ama bu hücrelerin nerede olduğu tahmine açık." Hayal kırıklığı yaratan yanlış ipuçları elde edildiyse de şimdiye dek onları kimse bulamadı.*

Manyetik reseptörlerin nasıl çalıştığına dair ikinci varsayım, çoğunlukla köpekbalıkları ve vatozlar için geçerli olan elektromanyetik indüksiyonla ilgilidir. Köpekbalığı yüzerken çevresindeki suda zayıf

* Onlarca yıldır pek çok biliminsanı, güvercinlerin ve diğer kuşların gagalarında manyetit yüklü nöronlar bulduklarından emindi.[36] David Keays manyetik algılama üzerine çalışmaya başladığında, bu nöronları araştırmayı planlıyordu. Fakat "akla gelebilecek her türlü yöntemi" kullandığı halde o nöronları bulamadı. Keays 2012'de başkalarının bulduğu iddia edilen manyetit nöronların aslında nöron olmadığını göstererek bomba etkisi yaratan bir çalışma yayımladı.[37] Aynı yıl, başka bir ekip, manyetit esaslı reseptörleri tanımlamanın kesin bir yolu gibi görünen bir yöntem geliştirdi.[38] Mikroskop altında, dönen bir manyetik alana yerleştirildiğinde, alabalığın burnundaki bazı hücrelerin kendi etrafında döndüğünü gördüler. Bu hücreler manyetik olmalıydı ve görünüşe göre manyetit tortuları içeriyor gibi görünüyorlardı. Ama Keays bu bulguyu da çürüttü.[39] Dönen hücrelerin sadece yüzeylerinde demir lekeleri olduğunu gösterdi. Bu hücreler manyetik reseptör değildi. Sadece kirliydiler.

elektrik alımları oluşturur ve bu akımların şiddeti, köpekbalığının jeomanyetik alanla yaptığı açıya göre değişir.[40] Köpekbalığı, son bölümde gördüğümüz elektroreseptörleriyle bu minik değişkenlikleri algılayarak hangi yöne gideceğine karar veriyor olabilir. Gerçekten böyle olup olmadığını bilmiyoruz ama bu, akla yakın bir açıklama. Köpekbalığının elektrik duyusu, manyetik duyu olarak da işlev görüyor olabilir.

Su gibi iletken bir sıvıya batıramayacağınız hayvanlarda, sözgelimi kuşlarda, manyetik indüksiyonun nasıl işlediğini hayal etmek zor olduğundan, bu açıklama genellikle göz ardı edilir. Ama indüksiyonun bu hayvanlarda da geçerli olabileceği bir durum var. Fransız zoolog Camille Viguier, 1882'de, manyetik algılamanın doğrulanmasından çok önce bunu öngörmüştü.[41] Bir kuşun iç kulağının iletken sıvıyla dolu üç kanal içerdiğini fark etmişti. Kuş uçarken jeomanyetik alan teorik olarak bu sıvıda saptanabilir bir voltaj yaratabilir. Yaklaşık 130 yıl sonra David Keays, onun haklı olduğunu doğruladı.[42] Dahası, bu kuşların iç kulaklarında, köpekbalıklarının elektrik alanları algılamak için kullandığı proteinin aynısı bulunur. "Galiba indüksiyon kuşların manyetik alanları saptayabilmesi açısından gerçekçi bir mekanizma ve şu anda bunu daha ileri düzeyde sınıyoruz," diyor Keays.*

Manyetik algılamayla ilgili üçüncü açıklama, en karmaşık ama aynı zamanda gelişimi en fazla ivme kazanmış açıklamadır. Kimyasal tepkimesi manyetik alanlardan etkilenen, *radikal çifti* olarak adlandırılan bir çift moleküle ilgilidir.[44] Bunu derinlemesine anlamak için kuantum fiziğinin tuhaf dünyasına dalmalısınız. Ancak yeterince iyi anlamak için iki molekülün dans ettiğini hayal etmeniz yeterli. Işık, iki partnerin birbirine tutunmasını sağlayarak dansı başlatır. Bu uyarılmış duruma ulaştıktan sonra manyetik alanların etkisiyle dansın temposu ve son adımları değişir. Partnerlerin son konumları, önceki hareketlerini biçimlendiren manyetik alanların bir kaydını sunar. Radikal çifti, saptaması zor bir

* Dikkate değer bir başka konu, 2011'de Le-Qing Wu ve David Dickman'ın, bir güvercinin beyninde manyetik alanlara yanıt veren ve iç kulakla bağlantılı nöronlar tanımlamış olmasıdır.[43]

manyetik uyaranı, değerlendirmesi basit bir kimyasal uyarana dans yoluyla dönüştürür.*

1970'lerde, kimyagerler radikal çifti tepkimelerini çoğunlukla deney tüplerinde inceliyorlardı. Fakat 1978'de Alman kimyager Klaus Schulten, bu anlaşılması zor tepkimelerin, kuş hücrelerinde de olabileceğini ve onların manyetik alanlara verdiği pusula benzeri tepkileri açıklayabileceğini iler sürdü. Bu fikrini açıklayan bir makaleyi, prestijli bir dergi olan *Science*'a gönderdi ve karşılığında unutulmaz bir ret cevabı aldı: *Daha az cüretkâr bir biliminsanı bu fikri çöp kutusuna atabilirdi.*[45] İstifini bozmayan Schulten makaleyi yine de yayımlattı.[46] Makaleyi ne yazık ki pek bilinmeyen bir Alman dergisine göndermiş ve kuantum fiziği konusunda bilgili ve tecrübeli olmayan bir biyoloğun –yani hemen hiçbir biyoloğun– anlayamayacağı şekilde yazmıştı. Schulten zamanının ilerisindeydi ve radikal çiftleri konusundaki içgörüsü, yaşadığı birkaç önemli aydınlanmadan sadece birisiydi.†

Bir sonraki aydınlanmayı, fikirlerini sunduğu bir konferansa katılan Nobel ödüllü bir araştırmacının şu sorusu üzerine yaşadı: *Radikal çifti tepkimelerini ışık tetikliyorsa ışık kuşun neresinde?* Schulten, manyetik reseptörlerin, radikal çiftlerine bağlıysalar vücudun herhangi bir yerinde olamayacaklarını fark etmişti. Muhtemelen ışık toplamaya en uygun organlarda olmalıydılar. Schulten ötücü bir kuşun pusulasının gözlerinde bulunduğunu öne sürdü. Bu fikir, 1998'de Schulten yeni bir keşif hakkında okuyana kadar rafa kalktı. *Kriptokromlar* olarak adlandırılan ve o zamana dek yalnızca hayvan beyninde bulunduğu düşünülen

* Bu da açıklamanın uzun hali: Işık molekül çiftine çarpınca, moleküllerden biri, diğerine bir elektron vererek ikisinde de eşlenmemiş bir elektron bırakır. Eşlenmemiş elektronu olan moleküllere radikal denir; dolayısıyla bu örnektekiler radikal çiftidir. Elektronların, ayrıntılarını kuantum fizikçilerine bırakabileceğimiz "spin" denilen bir özelliği vardır. Biyologlar için önemli olan, "spin"in ya yukarı ya da aşağı yönde olabildiği; radikal çiftinin "spin"lerinin aynı ya da birbirine zıt olabileceği; bu iki durum arasında saniyede birkaç milyon kez gidip gelebildikleri ve manyetik alanın bu git-gellerin frekansını değiştirebildiğidir. Yani bu iki molekül, manyetik alana bağımlı olarak şu ya da bu durumda bulunur ve bu da onların kimyasal açıdan ne kadar reaktif olduklarını belirler.

† Klaus Schulten ile 2010'da bu kitabı yazma fikri daha ortada yokken görüşmüştüm. Schulten 2016'da öldü.

moleküller gözlerde de bulunmuştu. "Sandalyemden düştüm," demişti Schulten çünkü kriptokromların, flavinler denen moleküllerle radikal çiftleri oluşturabildiğini hatırlamıştı. Kuramının eksik parçası buydu işte: Hayal ettiği dansta rol alabilecek ve tam da olması gerektiği yerde bulunan bir molekül.

Schulten ve öğrencisi Thorsten Ritz, 2000 yılında, ötücü kuşların pusulasının, gözdeki kriptokromlara bağlı çalıştığını savunan bir makale yayımladılar.[47] Bu, oyunun kurallarını değiştirdi. Ritz sayesinde konu nihayet biyologlar için anlaşılır hale gelmişti. Ayrıca biyologlara üzerinde çalışabilecekleri somut bir şey, inceleyebilecekleri gerçek bir molekül vermişti. Araştırmacılar deney üzerine deney yaparak Schulten'in öngörülerinin çoğunu doğruladılar. Örneğin Wiltschko'lar ötücü kuş pusulasının gerçekten de ışığa –özellikle de mavi ya da yeşil ışığa– bağımlı olduğunu keşfetti.*

Kuş gözlemcisiyken biyolog olan, manyetik algılama alanının günümüzdeki önde gelen isimlerinden Danimarkalı araştırmacı Henrik Mouritsen de ışığın önemli olduğunu doğruladı.† Mouritsen kızılgerdanları ve boz ötleğenleri ay ışığıyla aydınlanan bir odaya koyup kızılötesi kameralarla filme çekti. Kuşlar *Zugunruhe* sergilemeye başlayınca, özellikle etkinleşen bölgeler olup olmadığını anlamak için beyinlerini inceledi. Böyle bir bölge buldu. N kümesi olarak adlandırılan bu bölge beynin en ön kısmında yer alır.[48] Sadece ve sadece göçmen ötücü kuşlar (göçmen olmayanlar değil) geceleri uçarken (uçmadıkları gündüz saatlerinde değil) pusulalarını yön bulmak için kullandıkları sırada etkinleşir. Görünüşe göre N kümesi kuş beyninin manyetik işlem merkezidir. Aynı zamanda beynin *görme merkezlerinin* de bir parçası olması manidardır. N kümesi retinadan enformasyon alır ve yalnızca kuşun gözleri

* Bu dalga boyları, tam da kriptokrom ile flavini bir radikal çiftine dönüştürmeye uygun enerjiye sahiptir. Kuşun pusulası, sadece kırmızı ışık varken çalışmaz.

† On yaşından beri kuş gözlemcisi olan Mouritsen hayatı boyunca 4 binden fazla tür gördü. Başlangıçta lise öğretmeni olmak istiyordu çünkü öğretmenlerin tatilleri uzundu; böylece uzun süreli kuş gözlemi gezilerine çıkabilecekti. Sonunda biyoloji profesörü olmasına rağmen "Dışarı çıkmaya vaktim olduğunda hâlâ bir kuş gözlemcisiyim," diyor. "Koronavirüs günlerinde en çok bunu özledim. Hiçbir yere seyahat edemiyordum." Kıtalararası göç eden hayvanlar üzerinde çalışan birinin bu duruma düşmesi kaderin cilvesi olsa gerek.

açık olduğunda, etrafta biraz ışık varsa etkinleşir.[49*] Mouritsen, ışığa bağımlı radikal çifti fikriyle ilgili olarak, "Bence bu, mevcut deliller içinde en güçlüsü," diyor.

Bu kanıtlar şaşırtıcı bir sonuca işaret ediyor: Ötücü kuşlar, Dünya'nın manyetik alanını, belki de normal görüş alanlarını kaplayan ince bir görsel ipucu olarak *görüyorlardır*. Mouritsen, "Bu en olası senaryo, ancak kuşlara soramadığımız için doğru olup olmadığını bilmiyoruz," diyor. Belki de bir kızılgerdan uçarken kuzey yönünde hep parlak bir nokta ya da belki manzaranın üzerine sıvanmış bir gölge gradyanı görüyordur. "Elimizde böyle çizimler var ve muhtemelen hepsi yanlış ama yine de kuşların neler görüyor olabileceğini hayal etmek için iyiler."

Radikal çifti en muhtemel görünen fikir olsa da[†] üç varsayımın – manyetit, indüksiyon ve radikal çiftleri– tümü doğru olabilir. "Bence birden fazla mekanizma olduğu çok açık," diyor Keays. Fakat sanki bunlardan sadece ve sadece biri doğru olabilirmiş gibi, birçok biliminsanı farklı varsayımlar etrafında kamplaşmış. Sanki manyetik algılama üzerine çalışmak yeterince zor değilmiş gibi, insanlar kanlı bıçaklı hale gelmiş. Koca insanların ayağa kalkıp birbirlerine bağırıp çağırmaları bir

---

* Kızılgerdanlar gece göç eden kuşlardır; o nedenle ışıkla etkinleşen bir pusulaya güvenmeleri gariptir. Fakat geceleri bile etrafta az da olsa her zaman ışık vardır. Teorik hesaplamalar, ayın olmadığı, hafif bulutlu gecelerde bile ortamda pusulayı etkinleştirmeye yetecek kadar ışık olduğunu düşündürüyor.

† Radikal çifti, tek doğru fikir olsa bile geride yanıtlanmamış pek çok soru bırakıyor. Kuşlarda birkaç kriptokrom bulunur; pusulada rol oynayan hangisidir? (Cry_4 adlı kriptokrom adaylar arasında başı çekiyor. Kızılgerdanlar göç mevsiminde çok miktarda ve özellikle de retinalarındaki koni hücrelerinde bol miktarda Cry_4 üretir.[50]) Radikal çiftinin yaptığı dansın son adımları bir sinir sinyaline nasıl çevrilir? Kuşlar manyetik bilgiyi, normalde gördüklerinden nasıl ayırır? Ve Mouritsen'ın gösterdiği gibi,[51] belli bazı elektrikli cihazların ürettiği ya da AM radyoda kullanılan türden son derece zayıf radyofrekans alanları bir kuşun pusulasını neden bozar? Bu tür alanlar işe yarayacak enformasyon taşımadıkları gibi insan faaliyetlerinin yalnızca son yüzyılında kullanımları yaygınlaşmıştır. Dolayısıyla kuşlarda bu alanları algılama duyusu evrilmiş olamaz; o halde niye etkileniyorlar? "Sensörü, düşündüğümüzden çok daha hassas kılan önemli bir şeyi gözden kaçırıyor olmalıyız," diyor fizikçi Peter Hore. "Bu da kuramlarımızın tam gelişmediği anlamına geliyor. Kesin sonuç verecek deneyi henüz yapmadık." Hore ve Mouritsen yine de deniyorlar. Kesinlikle yazmamam koşuluyla Hore'un bana detaylarını anlattığı iddialı, yeni bir projeye başladılar.

konferansı rezil bir maskaralığa dönüşmüş. "Herkes manyetik reseptörü ilk bulan olmak istiyor ve bu da insanları aniden çok daha rekabetçi ve daha kaba kişilere dönüştürüyor."

Ve aynı zamanda daha özensiz kişilere.

Bu kitapta, hayvan duyuları hakkında sonunda doğru olduğu kanıtlanan fikirlerinden ötürü alay edilen ya da ciddiye alınmayan biliminsanlarının hikâyelerini öğrendik. Ama bunun tam tersiyle de aynı derecede sık, hatta belki de daha sık karşılaşıyoruz: Doğru olduğu düşünülen ama sonradan yalanlanan keşiflerle. Manyetik algılama konusunda böyle vakalar çoktur.

1997'de yapılan bir çalışmada balarılarının manyetik alanları saptayabildiği iddia edilmişti.[52*] Yirmi yıl sonra başka bir grup, ilk ekibin çok önemli bir istatistiksel hata yaptığını, arılar yerine rasgele sayı üreteçleri üzerinde çalışmış olabileceklerini gösterdi.[53] 1999'da Amerikalı bir ekip, kral kelebeklerin pusula duyusuna sahip olduğunu iddia etti; daha sonra kelebeklerin aslında giysilerinden yansıyan ışığa yöneldiklerini fark edince makalelerini geri çektiler.[54] Wiltschko'lar 2002'de, kızılgerdanın sadece sağ gözünde pusula bulunduğunu ve yalnız sol gözüyle yön bulamayacağını iddia eden klasik makalelerini yayımladılar.[55] On yıl sonra Henrik Mouritsen ve meslektaşları, yaptıkları dikkatli deneyler sonucunda her iki gözde de pusula bulunduğunu gösterdiler.[56] 2015'te Amerikalı bir ekip, manyetik reseptörü bir yuvarlak solucanda [*nematod*] bulduğunu iddia ederken,[57] Çinli bir grup da meyve sineklerinde bulduğunu söylüyordu. Bu iki çalışmadan ne biri ne de öbürü diğer araştırmacılar tarafından tekrarlanabildi ve meyve sineği çalışmasının "temel fizik yasaları" ile çeliştiği söylendi.[58]

Bilimin işleyişi bir dereceye kadar böyledir. Biliminsanları, birbirlerinin deneylerini tekrarlayarak bulgularını kontrol eder; tekrarlanabilir olanların üzerine yenilerini eklerken, tekrarlanamayanları çürütürler. Fakat manyetik algılama, başlangıçta heyecan uyandıran olağanüstü fazla sayıda çalışmanın daha sonra yanlış olduğunun ortaya çıkmasıyla

* Bu kusurlu deney bir yana, balarılarının manyetik alanları algılayabildiğine dair iyi deliller var.

sekteye uğramıştır. Manyetik algılama yetisine sahip olduğu varsayılan bazı hayvanlar muhtemelen bu duyuya sahip değil.* "Başkalarının savlarının peşinden koşarak çok zaman harcadık ve çok sabırlı davrandık," diyor David Keays bıkkınlıkla. "Ama çoğu yanıltıcıydı." Bilim kendi kendini düzeltir, ancak manyetik algılama biliminin diğer bilimlerin çoğundan daha fazla düzeltilmeye ihtiyacı var gibi görünüyor. Bu duyuyla ilgili iddiaların çoğu yanlış. Kitap boyunca, duyularımız bizi hayal gücümüzle gereken sıçramaları yapmaktan alıkoyduğu ve esasen öznel oldukları için hayvan Umwelt'lerini anlamanın zor olduğunu gördük. Fakat diğer Umwelt'leri doğru dürüst anlamamızın önünde daha basit bir engel var: Hayvan duyuları üzerine çalışırken kolayca yanlış yollara sapılabilmesi.

Hayvan davranışları üzerine yapılan çalışmalar insan davranışlarından da olumsuz etkilenmektedir. İnsanlar görmek istedikleri örüntüleri görür. Kuşların eğri büğrü ayak izleri güneybatı tarafında gerçekten daha mı yoğun yoksa güneybatıya gideceklerini umduğunuz için siz mi öyle yorumluyorsunuz?† Biliminsanları bu tür yanlılıklara olan yatkınlığı orta-

---

* İnsanlarda bile manyetik duyunun bulunup bulunmadığı konusu tartışmalıdır. 1980'lerde Britanyalı zoolog Robin Baker, gözlerini bağladığı üniversite öğrencilerinin dolambaçlı yollardan geçirdikten sonra eve dönüş yolunu göstermelerini istedi. Beklenenin üzerinde başarılı oldular ama başlarına mıknatıs yerleştirildiğinde öyle olmadı. Baker sonuçlarını dünyanın önde gelen bilim dergilerinden *Science*'ta yayımladı.[59] Fakat tekrar tekrar aynı sonuçları elde etmesine rağmen, başkalarının sonuçları farklı çıktı. İki araştırmacı, "Varlığını kanıtlamanın çok zor olduğu manyetik duyunun ekolojik önemini merak etmek zorunda kalıyoruz," diye yazmıştı. Baker'ın yaptığı deneyleri sık sık eleştiren jeofizikçi Joseph Kirschvink bir süre önce, çevresinde yapay bir manyetik alan döndürülen gönüllülerde, belirli beyin dalgalarının değiştiğini gösterdi.[60] Kirschvink bundan, insanların manyetik algılama yetisi olduğu gibi bir anlam çıkardı. Diğerleri ikna olmadı. "Herhalde sadece kendi adıma konuşabilirim ama ben manyetik alanları kesinlikle saptayamıyorum," diyor Keays. "iPhone'daki iyi bir pusula aplikasyonunu kullanıyorum ve benim manyetik reseptörüm o." Kirschvink insanların, manyetik uyaranların bilinçdışı farkında olduğunu savunuyor ama yine de o farkındalığın bir şekilde işe yaradığını göstermesi gerek. Aksi takdirde ne anlamı var ki? Farkında olmadığımız ve herhangi bir şey kullanmadığımız bir duyu bizim için niye önemli olsun?

† Açıkçası, 1950'lerde ve 60'larda ötücü kuşlarla yapılan ve bu hayvanlarda manyetik pusula bulunduğunu doğrulayan ilk çalışmalar sağlamdır. Birçok laboratuvarda, pek çok türle yapılan çalışmalarda aynı sonuçlar elde edilmiştir.

lama bir insanınkinden daha az değildir ama yanlılıkların işlerine karışmasını engellemenin yolları vardır. Örneğin, önemli bilgileri son âna kadar kendilerinden bile gizledikleri bir "kör" çalışma yürütebilirler. Bu, bütün deneylerde standart uygulama olmalı. Ama öyle değil.

Bu da yetmezmiş gibi, saptanması zor olan manyetik reseptörü bulma çabası bir yarışa dönüşmüş durumda. Kazanana zafer ve ödül vaadi, dikkatli ve yöntemli çalışma yerine hızlı araştırmaları ve büyük iddiaları teşvik etti. Araştırmacılar hepi topu birkaç hayvanla deney yapıp şans eseri olabilecek sonuçlar elde edebilirler. Heyecan verici bir şey bulmak için deney planlarında anında ufak tefek değişiklikler yapabilirler; bu yönteme "p-hacking" denir.[61] Fikirlerine uymayan bulguları eleyip en iyi verileri cımbızlayabilirler.

Manyetik alanlar algılanabilir olmadığından, biliminsanları her şeyi doğru yapsalar da bocalayabilirler. Görme ya da işitme duyusu üzerine çalışan bir araştırmacı, donanımının kazara parlak ışıklar ya da yüksek sesler çıkardığını fark edecektir. Ama manyetik algılama söz konusu olduğunda, "Aptalca bir şey yapsanız bile fark etmezsiniz," diyor Mouritsen. Hayvanları düzensiz ya da doğal olmayan manyetik alanlara maruz bırakıyor olabilirsiniz ve en kaliteli donanımı kullanarak sürekli kontrol etmediğiniz takdirde bir sorun olduğunu ruhunuz bile duymaz. Marketten alacağınız araç gereçle bir elektrikli balığın ya da ağaç piresinin Umwelt'ine dalabilirsiniz. Ama manyetik algılamada "Ucuz donanımla çalışamazsınız," diyor Mouritsen. "Doğru dürüst ölçüm yapmak çok pahalıya patlar."

Ayrıca manyetik alanlar akla mantığa sığmaz. Insane Clown Posse'nin şarkıda söylediği gibi, "Lanet mıknatıslar nasıl çalışır?" Ya da Warrant'ın dediği gibi, "Hayvanın uyarandan ne algıladığını anlamak bir yana, uyaranın kendisini bile anlamakta yeterince güçlük çekiyorum." Ekolokasyon ya da elektro-algılama gibi diğer sıradışı duyular en azından işitme ya da dokunma gibi daha tanıdık duyularla karşılaştırılabilir. Ama bir iribaş deniz kaplumbağasının Umwelt'i hakkında düşünmeye nereden başlanacağına dair en ufak bir fikrim yok.

Radikal çifti açıklamasının bu kadar ilgi görmesinin sebebinin kısmen bu olup olmadığını merak ediyorum. Ne kadar karmaşık olsa da bu açıklama, manyetik algılamayı kolayca anlayabileceğimiz görme

duyusunun alanına getiriyor. Benzer şekilde pusulalardan bahsediyoruz çünkü onlar manyetizmanın soyut dünyasına girmemiz için tanıdık bir geçit sunuyor. Ancak pusula mecazı yanıltıcı olabilir. Pusulalar hassas ve güvenilirdir. Kuzeyi göstermek zorundadırlar, iki arada bir derede kalamazlar. Ama Sönke Johnsen, Ken Lohmann ve Eric Warrant, biyolojik pusulaların doğası gereği gürültülü olduğundan şüpheleniyorlar.[62] Yani Dünya'nın manyetik alanı çok zayıf olduğundan, biyolojik pusulaların bu alanı anında hassas ve doğru bir biçimde okuması imkânsız olabilir.

Hayvanlar, manyetik reseptörlerinden gelen sinyallerin hareketli ortalamasını uzun süre boyunca tutmak zorunda kalabilirler. Bu sınırlama manyetik algılamayı yavaş, hantal ve son derece paradoksal hale getirir. Gezegendeki en yaygın ve güvenilir uyaranları –jeomanyetik alan– saptar ama doğası gereği bunu güvenilir biçimde yapmaz. Manyetik algılamayla ilgili çalışmaların pek çoğunun tekrarlanmasında yaşanan zorluk bundan kaynaklanıyor olabilir. "Aynı mükemmel deneyi birden fazla yapsanız bile tutarlı bir sonuç elde etmek gerçekten zor olabilir," diyor Warrant.*

Diyelim ki bir hayvanın doğru yönü belirlemesi için düzensiz sallanan pusulasından yeterli bilgiyi toplaması için beş dakikaya ihtiyacı var. Deneyi yapanlar bu hayvanı bir manyetik alana maruz bırakıp tepkilerini bir dakika sonra kaydederlerse karman çorman sonuçlar elde edilecektir. Bu zaman aralıklarını keyfe keder seçtim ama önemli olan şu ki doğru zaman aralıklarını bilmiyoruz. Bizler görme ve işitme gibi neredeyse anlık bilgi veren duyulara alışkınız. Manyetik algılama muhtemelen böyle çalışmıyor ama hangi zaman ölçeklerine göre çalıştığını da bilmiyoruz. Bunları bilmeden, hatta bulmamız gerektiğini bile anlamamışken, iyi deneyler tasarlamak zor. Giriş bölümünde yazdığım gibi, bir biliminsanının elde ettiği veriler, sorduğu sorulardan etkilenir; sorularını hayal gücü yönlendirir ve hayal gücüyse duyularıyla sınırlıdır. Kendi Umwelt'imizin hudutları, başkalarının Umwelt'lerini anlayabilme yetimizi kuşatır.

---

* Ekolokasyon ve elektro-algılama aşağı yukarı aynı zamanda keşfedildi ama bunların ikisinde de tekrarlanabilir olmayan ya da çelişkili sonuçlar açısından manyetik algılamadakine yakın düzeyde bir sorun yaşanmadı.

Hiçbir hayvanın tek başına bu duyuya güvenmemesinin sebebi, manyetik algılamanın gürültülü ve düzensiz doğası olabilir. Görünüşe göre hayvanlar manyetik algılamayı, görme gibi daha güvenilir olan duyunun çuvallaması durumunda bir yedek duyu olarak kullanmaktadır.[63] "Göç eden bir hayvansanız manyetik algılama, kaybolmadığınız sürece, muhtemelen en az önemli duyunuz olacaktır," diyor Keays. Bogong güveleri, manyetik işaretler olmadan da gece gökyüzündeki yıldızların örüntülerine bakarak yönlerini bulabilirler. Yumurtadan çıkan deniz kaplumbağaları suya ilk girdiklerinde manyetik alanları görmezden gelir, denize açılmak için dalgaların yönünü kılavuz olarak kullanırlar.

Hayvanlar hiçbir zaman tek bir duyuyu tek başına kullanmazlar. "Ellerine geçen her bilgi parçasını kullanırlar," diyor Warrant. "Mümkün her şekilde çoklu duyusaldırlar."

12.

Aynı Anda Tüm Pencerelerden Bakmak

Duyuları Birleştirme

Kendimi, aslında kaşınmadığıma inandırmaya çalışıyorum. Sadece etrafım on binlerce sivrisinekle sarılı olduğu için böyle. Hepsi Zika, deng ve sarı hummanın yayılmasından sorumlu *Aedes aegypti* türünden sivrisinekler. Şükürler olsun ki bulunduğum küçük, kapalı odadaki böcekler beyaz tül kafeslerin içinde. Nörobilimci Krithika Venkataraman, kafeslerden birini raftan alıp yanımızdaki masanın üstüne koyarken bana sivrisineklerin konağı nasıl takip ettiklerini anlatıyor. Onunla birkaç dakika konuştuktan sonra masadaki kafese bakıyorum ve sivrisineklerin kafesin bize en yakın tarafında kümelenmiş olduğunu fark edince dehşete kapılıyorum. Bir görünüp bir kaybolan siyah kıllarla kaplı bir tarlaya benzeyen kan emici hortumlarıyla tülün dışını yokluyorlar. Kaşıntım daha da artıyor. Venkataraman nefesimizdeki karbondioksitin ve derimizden yayılan kokuların sivrisineklere çekici geldiğini söylüyor.[1] Bizi koklayabiliyorlar. Bunu göstermek için farklı bir kafes alıyor; kafesin bir tarafına doğru nefesimi veriyorum. Hemen hemen bütün sivrisinekler dakikalar içinde o tarafa toplanıp hortumlarıyla tülü yoklamaya koyuluyor.

Venkataraman'ın çalıştığı laboratuvarı yöneten Leslie Vosshall, insanları *Aedes aegypti*'den korumak amacıyla sivrisineğin koku yetisini şaşırtmak için yıllarca uğraştı. Önce, sivrisineğin koku duyusunun bütünü için önemli görünen *orco* geninin işlevini bozmayı denedi. Bu

yaklaşım, Vosshall ile aynı katta çalışan Daniel Kronauer tarafından, daha önce gördüğümüz klonal akıncı karıncalarda denendiğinde işe yaramıştı. Ama Vosshall aynısını sivrisineklerde denediğinde işe yaramadı:[2] *Orco* geni olmayınca sivrisinekler insan vücudunun kokusunu görmezden geliyor ama yine karbondioksite yöneliyordu. Vosshall'un ekibi taktik değiştirip karbondioksit kokusu almayan mutant sivrisinekler yaratmaya çalıştı.[3] Bu da işe yaramadı: Böcekler hâlâ kolayca insanlara yönelebiliyordu. "Sonuçlar berbattı," diyor Vosshall.

Sivrisineklerden tek bir stratejiyle kurtulmak mümkün değil, çünkü tek bir duyuya bağlı kalmayıp karmaşık şekillerde etkileşime giren çok sayıda ipucu kullanıyorlar. Sıcakkanlı konağın ısısı, önce karbondioksitin kokusunu alması koşuluyla sivrisineğin dikkatini çeker. Vosshall'un öğrencisi Molly Liu, sivrisinekleri bir odaya koyup duvarlardan birini yavaş yavaş ısıttığında, yüzey insan vücudu sıcaklığına ulaşana dek böceklerin çoğu çekip gitti.[4] Ama Liu odaya karbondioksit spreyi sıkınca sivrisinekler sürü halinde sıcak duvara üşüştü. Isı, karbondioksit yoksa itici etki gösteren bir tehlikeye, karbondioksit varsa çekici bir öğüne işaret eder.* Vosshall insanları sivrisineklerden korumanın bir yolunu bulabileceğine hâlâ inanıyor ancak koku, görme, ısı, tat gibi pek çok duyuyu göz önüne alması gerekecek. *Aedes aegypti*'nin "her noktada bir B planı" olduğunu söylüyor.†

Sivrisinek duyuları binlerce yıllık evrim boyunca bilenmiştir. *Aedes aegypti* başlangıçta, çeşitli hayvanlardan kan emdiği Sahraaltı Afrika ormanlarından çıktı. Ama binlerce yıl önce belli bir soyun damak zevki, nüfusun yoğun olduğu yerleşim bölgelerinde yaşamaya başlayan

---

* Bizim duyularımız da benzer değişimlere uğrar. Kirli çorap resmi gösterip izovalerik asit koklatırsanız kokunun iğrenç olduğunu söyleyen kişi, aynı kimyasalı Époisses peyniriyle eşleştirirseniz nefis koktuğunu söyler.

† Sonuçta DEET de muhtemelen aynı şeyi yapıyor.[5] ABD Tarım Bakanlığı tarafından 1944'te geliştirilen ve başlangıçta tropikal ülkelerdeki askeri birlikleri, daha sonra bütün dünyadaki sivilleri korumak amacıyla kullanılan DEET'nin uzun bir geçmişi var. İşe yarıyor ama aslında kimse neden işe yaradığını bilmiyor. Vosshall ilk başta DEET'nin *orco*'yu engellediğinden şüpheleniyordu ama artık sivrisineğin koku (ve tat) duyusunu daha karmaşık yollardan üç kâğıda getirdiğini düşünüyor. Vosshall bu etkinin aynısını oluşturabilirse DEET'den daha fazla ve uzun etkili ve bebekler için güvenli maddeler bulacağını umuyor.

insanlara yöneldi.[6] Bu bölgelerin çekiciliğine kapılan *Aedes aegypti*, şehirleri ormanlara tercih eden kentsel bir hayvana, Umwelt'i her şeyden çok, vücudumuzun ayırt edici işaretlerine hassas bir asalağa dönüştü. Artık bu sivrisinek gezegenin en etkili insan avcılarından biri olduğu gibi, son derece seçicidir. Bu yüzden Venkataraman gibi biliminsanları tutsak sivrisinekleri beslemek için genellikle kollarını kafese sokar. "Yaklaşık 10 dakika sürer," diyor. "Düzenli olarak yapmadığım için ısırıklara hâlâ tepki veriyorum ama kaşımadığın sürece sorun olmuyor." Kaşımadan durmayı hayal etmek zor.

Onun yerine sivrisinek olmanın nasıl bir şey olduğunu hayal edelim. Tropikal iklimin kesif havasında, koku bulutlarının arasından geçerek uçuyorsunuz; derken antenleriniz karbondioksitin kokusunu alıyor. Ayartılmış bir halde kokuya yöneliyor, izini kaybedince tekrar bulana dek zikzak çiziyor, bulduğunuz anda ok gibi fırlıyorsunuz. Karanlık bir siluet dikkatinizi çekiyor; araştırmak için ona doğru uçuyorsunuz. Bir laktik asit, amonyak ve sulkaton (insan derisinden salıverilen moleküller) bulutuna dalıyorsunuz. Nihayet son işaret de geliyor: Çekici bir ısı patlaması. Siluetin üzerine konuyorsunuz; ayaklarınız tuzun, yağların ve başka lezzetlerin yoğun tadını alıyor. Duyularınız işbirliği yaparak yine bir insan buldu. Bir damar bulup kana kana içiyorsunuz.

Giriş bölümünde, Umwelt kavramının öncüsü Jakob von Uexküll'ün hayvan vücudunu, duyu pencereleri bahçeye bakan bir eve benzettiğini görmüştük. Sonraki 11 bölüm boyunca bu pencerelerden teker teker bakıp her bir duyuyu benzersiz kılanın ne olduğunu anlamaya çalıştık. Birçok duyu biyoloğu aynısını yapar ve meslek hayatı boyunca tek bir pencereden bakar. Hayvanlar böyle değildir. *Aedes* sivrisinekleri gibi diğer hayvanlar da tüm duyularından aynı anda gelen enformasyonu birleştirir ve çapraz kontrol yapar. Biz de onların izinden gitmeliyiz. Onların Umwelt'lerini gerçekten anlayabilmek, duyularla ilgili yolculuğumuzu nihayete erdirmek için Uexküll'ün metaforik evini bir bütün olarak ele almalıyız. Bir hayvanın bütün vücudunun, Umwelt'inin doğasını nasıl belirlediğini anlamak için evin mimarisini incelemeliyiz. Hayvanların dış dünyadan gelen duyusal enformasyonu kendi vücutlarından gelen enformasyonla nasıl birleştirdiğini görmek için evin içine

bakmalıyız. Hayvanların tüm duyularını nasıl bir arada kullandığını anlamak için pencerelerin her birinden aynı anda bakmalıyız.

Her duyunun avantajları ve dezavantajları vardır; her uyaran bazı koşullarda işe yarar, bazı koşullarda yaramaz. Bu yüzden hayvanlar, bir duyunun güçlü yanlarını diğer duyunun eksikliklerini telafi etmek için kullanarak, sinir sistemlerinin kaldırabileceği kadar çok enformasyon akışından yararlanır. Hiçbir hayvan türü, diğer tüm duyuları dışlama pahasına tek bir duyu kullanmaz. Belli bir duyusal alanın mükemmel örneği olan hayvanların bile emrine amade birden fazla duyusal alan bulunur.

Köpekler koku duyusunun ustasıdır ama koca kulaklarını unutmayın. Baykuşlar işitme duyusunun ustasıdır ama kocaman gözlerini de es geçmeyin. Sıçrayan örümcekler büyük gözlere ihtiyaç duyar ama ayaklarıyla hissettikleri yüzey titreşimlerine ve hassas kılları saptıran, hava kaynaklı seslere de duyarlıdırlar.[7] Foklar, bıyıklarıyla balıkların hidrodinamik izini sürer ama avlanırken gözleri ve kulakları da onlara yardım eder. Yıldız burunlu köstebek, toprak altındaki tünellerde dokunma duyusunu kullanarak avlanır ama suyun altında yiyecek ararken yıldızından üflediği baloncukları avının kokusunu almak için tekrar içine çeker.[8] Karıncaların yaşamına koku egemendir ama sesler de kimi asalakların, kraliçenin seslerini taklit ederek karıncaları kandırıp yuvaya sızmasına yetecek kadar önemlidir.[9] Kokular, köpekbalıklarını kilometrelerce uzaktaki besine doğru yönlendirir ama aradaki mesafe kapandıkça görme duyusu ve yanal çizgi devreye girer; saldırının son anlarındaysa elektrik duyusu işe koyulur.[10] Fil burunlu balık, yakınındaki küçük nesneleri, oluşturduğu elektrik alanlarıyla tespit eder ama elektrik duyusunun menzili dışında kalan ve hızlı hareket eden yırtıcılar gibi büyük nesneleri gözleriyle saptar.[11] Ötücü kuşlar ve bogong güveleri yön tayininde Dünya'nın manyetik alanından faydalanır ama göç sırasında göksel manzaraların rehberliğine de ihtiyaç duyar.[12] Daniel Kish evinin civarında yürürken ekolokasyondan faydalanıyor ama aynı zamanda uzun bir baston kullanıyor.

Duyular, birbirini tamamlamanın ötesinde, birleşebilirler de. Sinestezik insanlarda farklı duyular birbirine karışmış gibidir.[13] Bazı sinestetler için seslerin dokuları ya da renkleri vardır. Bazıları için sözcüklerin tadı olabilir. Bu kavramsal bulanıklık insanlar arasında özel bir durum

teşkil eder ama diğer hayvanlarda standarttır. Örneğin, ornitorengin ördeğinkine benzeyen gagası, bazıları elektrik alanlarını saptayan, bazılarıysa dokunmaya hassas reseptörler içerir.[14] Fakat beyindeki nöronlar her iki reseptör grubundan gelen sinyalleri de alır. Ornitorengin belki de tek bir elektro-dokunma duyusu vardır. Besin aramak için daldığında, bir kerevitin suda yarattığı çalkantıyı hissetmeden önce, oluşturduğu elektrik alanını algılıyor olabilir. Bazı araştırmacılara göre, şimşek çakmasıyla gök gürültüsü arasında geçen süreye bakarak fırtınanın uzaklığını hesaplamamız gibi, ornitorenk de bu sinyaller arasında geçen süreye göre kerevitin uzaklığını tayin etmektedir.

Sivrisineklerinse görünüşe göre hem sıcaklığa hem de kimyasallara yanıt veren nöronları var. Leslie Vosshall'a bunun, böceklerin vücut sıcaklığının tadını aldıkları anlamına mı geldiğini soruyorum. Omuz silkiyor. "Dünyayı algılayabilmenin en basit biçimi, duyuların tamamen ayrı çalışması –nöronların tat, koku ya da görme duyularından sadece biriyle uğraşması– olurdu," diyor. "O zaman her şey çok düzenli olurdu. Ama ne kadar yakından bakarsak tek bir hücrenin aynı anda birden fazla şey yapabildiğini o kadar iyi anlıyoruz." Örneğin karıncaların ve diğer böceklerin antenleri hem koku hem de dokunma organıdır. Entomolog William Morton Wheeler 1910'da bir karıncanın beyninde "bunlar muhtemelen kaynaşarak tek bir duyu oluşturur," diye yazmıştı.[15] Parmak uçlarınızda narin burunlarınız olduğunu hayal edin, diyordu. "Sağımızdaki solumuzdaki nesnelere dokunarak hareket etseydik çevremiz bize kokulardan oluşuyormuş gibi gelirdi ve küresel, üçgen, sivri vb. kokulardan söz ediyor olurduk. Zihinsel süreçlerimiz, şu anda nasıl görsel (yani renkli) şekiller dünyası tarafından belirleniyorsa o zaman da büyük ölçüde kimyasal konfigürasyonlar dünyası tarafından belirlenirdi."

Duyular kaynaşmasa bile birbirine yaklaşabilir. Dokuzuncu Bölüm'de gördüğümüz gibi, yunuslar duyularından birini diğer duyularının erişebileceği zihinsel temsiller oluşturmak için kullanarak, daha önce ekolokasyonla taradıkları saklı bir nesneyi görsel olarak tanıyabilirler. Çapraz modal nesne tanıma olarak adlandırılan bu özellik, yunuslar ve insanlar gibi büyük beyinli türlerle sınırlı değildir. Çarpı işaretleriyle küreleri görsel olarak birbirinden ayırt etmeyi öğrenen elektrikli balıklar, bunları elektrik duyularını kullanarak da ayırt edebilir (ya da elektrik duyusunu kullanarak ayırt edebildiklerini görsel

olarak da ayırt edebilirler).[16] Bombus arıları bile nesneleri, aralarındaki görsel farklılıkları öğrendikten sonra dokunma duyusunu kullanarak ayırt edebilir.[17]

Bazı duyular aynı zamanda hayvanın içine bakıp onu bedeninin durumu hakkında bilgilendirir. Bedenin konumu ve hareketiyle ilgili farkındalığı sağlayan propriyosepsiyon[18] ve denge duyusu böyledir.* Bu içsel duyular nadiren tartışmaya dahil edilir. Aristoteles bu duyuları, beş duyu sınıflandırmasının dışında bırakmıştı; doğanın Umwelt'leri arasında yaptığımız bu yolculukta ben de onları büyük ölçüde göz ardı ettim. Ama önemsiz oldukları için değil, tam tersine kanıksanacak kadar önemli oldukları için. Görme ya da işitme duyusu olmadan idare edebiliriz ama içsel duyuların devri kabil değildir. Bu duyular, hayvana kendi bedeni hakkında bilgi verirken, diğer her şeyi anlamlandırmasına da yardımcı olur. Özellikle önemlidirler çünkü hayvan bedenleri Uexküll'ün metaforik evlerinin yapamadığı bir şey yapar.

Hareket ederler.

Hayvanlar hareket ederken duyu organları iki çeşit enformasyon toplar.[20] Bunlardan biri, dış dünyada olan biten şeylerin ürettiği dış sinyallerdir (eksaferenz). Diğeriyse hayvanın kendi eylemlerinin ürettiği sinyallerdir (reaferenz). Bu iki teknik terim arasındaki farkı hatırlamakta hâlâ zorlanıyorum; siz de aynı dertten mustaripseniz sinyalleri, dış kaynaklı (başkası tarafından üretilen) ve iç kaynaklı (kendisi tarafından üretilen) olarak düşünebilirsiniz. Masamda otururken, yaprakları rüzgârda titreşen ağacı görebiliyorum. Bu, başkası tarafından üretilen dış kaynaklı sinyaldir. Ama o dalları görebilmek için soluma bakmam gerekiyor; yaptığım ani hareket her iki retinamı boydan boya süpüren ışık örüntüleri gönderiyor. Bu da canlının kendisi tarafından üretilen (iç

* Milyonlarca insan görme, koku ya da işitme duyusu olmadan da gayet iyi yaşar. Ancak propriyosepsiyon duyusunu yitirmek çok daha fazla elden ayaktan düşürür. 1971'de bir enfeksiyon, Ian Waterman adlı 19 yaşında bir kasabı yatağa düşürüp otoimmün bir saldırıyı tetikleyerek propriyosepsiyondan yoksun bırakmıştı.[19] Uzuvlarından geribildirim alamayan Waterman eşgüdümlü hareket edemez hale geldi. Felç olmamıştı ama ne yürüyebiliyor ne ayakta durabiliyordu. Bedenini göremezse nerede olduğunu anlayamıyordu. Sadece 17 ay süren yoğun bir eğitimin ardından görsel kontrolle vücudunu nasıl hareket ettireceğini yeniden öğrendi.

kaynaklı) sinyaldir. Her hayvan, duyularından her biri için bu iki sinyal çeşidini ayırt etmek zorundadır. İşin püf noktası şu: Bu sinyaller, duyu organlarının bakış açısından *birbirinin aynıdır*.

Basit bir toprak solucanını düşünün.[21] Toprakta tünel kazarken, başındaki dokunma reseptörleri basıncı kaydeder. Ama solucanın başını parmağınızla dürttüğünüzde de dokunma reseptörleri aynı türden bir basınç kaydeder. Öyleyse solucan belli bir duyumsamanın kendi hareketinden mi (reaferenz) yoksa başkasının hareketinden mi (eksaferenz) kaynaklanıyor olduğunu nereden bilir? Bir şeye mi dokunduğunu yoksa kendisine mi dokunulduğunu nasıl bilebilir? Benzer şekilde, bir balığın yanal çizgisinin saptadığı su akışı, balığa doğru yüzen bir şeyden mi yoksa yüzmekte olan balığın kendisinden mi kaynaklanır? Bir hayvan, başkasının ürettiği sinyalleri kendisinin ürettiklerinden ayırt edemeseydi Umwelt'i anlamsız bir karmaşaya dönüşürdü.

O kadar temel bir sorundur ki bu, birbirinden çok farklı canlıların hepsi aynı çözümü üretmiştir.* Bir hayvan hareket etmeye karar verince, sinir sistemi kaslarına ne yapmaları gerektiğini söyleyen bir grup nöral sinyalden oluşan bir motor komut verir. Fakat kaslara doğru yol alırken bu komutun bir kopyası oluşturulur. Kopya, duyu sistemlerine gider ve orada, planlanan hareketin sonuçlarını gerçekmiş gibi canlandırmak için kullanılır. Hareket gerçekleştiğinde duyular, deneyimlemek üzere oldukları iç kaynaklı sinyalleri zaten öngörmüştür. Bu öngörüyü gerçeklikle karşılaştırarak, hangi sinyallerin gerçekten dış dünyadan geldiğini anlayıp ona göre tepki verebilirler.† Tüm bunlar biz farkında

---

* Teknik açıdan bakıldığında bu, yalnızca hareket eden hayvanların sorunudur. Tamamen hareketsizseniz duyu organlarınızdan gelen herhangi bir enformasyonun, kendi eylemlerinizden değil dışarıdan kaynaklandığına neredeyse emin olabilirsiniz. Ama hiçbir hayvan tamamen hareketsiz değildir;[22] sinir sistemi olmayan ve kayalara tutunarak yaşayan süngerler bile atıkları vücutlarından "hapşırarak" atar.

† Bunun işe yaraması açıkçası şaşırtıcı. Solunuza bakın. Beyniniz az önce göz kürenizin etrafındaki bazı kasların kasılması için basit bir sinyal gönderdi. Peki sinir sisteminiz bu sinyali kullanarak etrafınızdaki manzaranın değişeceğini nasıl öngördü? Bunu yaptığını biliyoruz, ancak sinir siteminin gerçek hesaplamaları nasıl yaptığı hâlâ bir sır. "Bir motor komutla başlayıp duyusal yapının kullanabileceği bir sinyale nasıl varırsın?" diye soruyor elektrikli balıklarla çalışan Nate Sawtell. "Esas sorun bu."

olmadan gerçekleşir ve sezgisel olmasa da dünyaya dair deneyimimizin merkezinde yer alır. Duyuların saptadığı enformasyon her zaman hayvanın kendi ürettiğiyle (iç kaynaklı) başkasının ürettiği (dış kaynaklı) enformasyonun bir karışımıdır ve sinir sistemleri sürekli olarak ilkinin bir benzerini oluşturduğundan, hayvanlar bu ikisini birbirinden ayırt edebilir.

Filozoflar ve akademisyenler bu süreç üzerine asırlarca fikir yürüttü.[23] 1613'te Belçikalı fizikçi François d'Aguilon "ruhun yaratılıştan gelen bir melekesinin gözün hareketini sezdiği"ni yazmıştı. 1811'de Alman hekim Johann Georg Steinbuch, hareketleri kontrol eden ve duyusal enformasyonla etkileşime giren *Bewegideen*, yani "devinim fikirleri" hakkında yazmıştı. 1854'te bir başka Alman hekim, Hermann von Helmholtz, *Bewegidee*'den "irade çabası" anlamındaki *Willensanstrengung* olarak bahsetti. 1950'ye gelindiğinde, ikinci kopyası oluşturulan motor komutlar *eferens kopyalar* ya da –bu terimler içinde favorim olan– *koroller deşarjlar* olarak adlandırılıyordu.[24*] Bu terimler arasında ufak tefek farklılıklar bulunmakla birlikte, hepsinin ana fikri aynıdır. Bir hayvan her hareket ettiğinde, farkında olmadan kendi iradesinin bir ayna yansımasını oluşturur ve bunu kendi eylemlerinin duyusal sonuçlarını öngörmek için kullanır. Duyular her eylemde ne beklemesi gerektiği konusunda önceden uyarılır ve kendini ona göre hazırlayabilir.

Biliminsanları, *koroller deşarjları* kullanarak elektrik duyularını kontrol eden filbalıklarını incelerken bu konuda çok şey öğrendiler.[26] Onuncu Bölüm'de gördüğümüz gibi, bu balıklarda üç çeşit elektroreseptör bulunur. Birinci grup, filbalığının kendi ürettiği elektrik sinyallerini saptar. İkinci grup *diğer* filbalıklarının iletişim amaçlı sinyallerini saptar. Üçüncü grupsa potansiyel avın ürettiği daha zayıf elektrik alanlarını tespit eder.[†] İkinci ve üçüncü grup, balık ancak kendi darbe sinyallerini görmezden gelirse çalışabilir ve bunu koroller deşarjlar yoluyla

---

* Otto-Joachim Grüsser, mükemmel makalesinde bu terimlerin eksiksiz bir tarihçesini ve arkalarında yatan fikri anlatır.[25]

† Duyu organlarının çoğu için olduğu gibi ampuller reseptörler ve knollenorganlar için de iç kaynaklı sinyaller gürültü, dış kaynaklı olanlar gerçek sinyaldir. Fakat balığın kendi sinyallerini saptayan tüberöz reseptörler için tam tersi doğrudur: İç kaynaklı olan gerçek sinyal, dış kaynaklı olansa gürültüdür.

yapar. Koroller deşarjlar, elektrik organı ateşlendiği zaman oluşur; beynin ikinci ve üçüncü grup reseptörlerden gelen sinyalleri alan kısmını, balığın kendi sinyallerini görmezden gelmeye hazırlar. Böylece bir filbalığı hangi sinyallerin pasif olarak potansiyel av tarafından, hangilerinin aktif olarak diğer elektrikli balıklar tarafından ve hangilerinin aktif olarak kendisi tarafından üretildiğini anlayabilir.

Elektrikli balıklar istisnai yaratıklardır ama "Hemen hemen tüm hayvanların az çok buna benzer bir mekanizması var," diyor Bruce Carlson. Koroller deşarjlar niye kendimizi gıdıklayamadığımızı açıklar: Kıpırdayan parmaklarımızın bizde nasıl bir duyumsama yaratacağını öngörürüz ve bu da gerçek duyumsamanın etkisini ortadan kaldırır. Gözlerimiz sürekli sağa sola oynarken bile görüşümüz koroller deşarjlar sayesinde istikrarını korur.* Cırcırböcekleri öterken, bu deşarjlar sayesinde kendi seslerini duymazdan gelebilir.[27] Balıklar yüzerken, koroller deşarjlar sayesinde kendi yarattıkları akıntıyla kafaları karışmadan diğer balıkların yarattığı akıntıları hissedebilir ve toprak solucanları yine bu sayede irkilme refleksi göstermeksizin toprağın altında ilerleyebilir.†

Bu beceriler çok temel olduğu için bize marifetmiş gibi gelmez. Bedenimizin bize ait olduğu, bizim de dünya üzerinde var olduğumuz ve ilkini ikincisinden ayırabildiğimiz apaçıkmış gibi hissederiz. Ancak bunlar açıklama gerektirmeyecek kadar net özellikler değildir. Kendini başkasından ayırt etmek o kadar basit bir konu değil, sinir sistemlerinin çözmesi gereken zor bir sorundur. Nörobilimci Michael Hendricks, "Hissetme yeteneği [*sentience*] büyük ölçüde bundan oluşur," diyor. "Hatta belki hissetme yeteneğinin *sebebi* budur: Algısal deneyimleri,

---

* Koroller deşarjlar diğer duyular için de geçerlidir. Beynimizde diyafram hareketini kontrol eden bölge, beynin koku merkezi olan koku soğancığına sinyal gönderir. Koku soğancığı, nefes alma ya da verme sırasında sinyalleri farklı biçimde işler.

† Bazı biliminsanları, şizofreninin temelde bir koroller deşarj bozukluğu olduğunu ileri sürmüştür.[28] Şizofrenisi olanlar, kendi iç seslerini dış seslerden ayırt edemedikleri için varsanılar ve sanrılar yaşar. Kendini başkasından ayıramama durumu, şizofrenideki daha garip semptomları, örneğin kendi kendini gıdıklayabilmeyi de açıklayabilir. Peki kendi deşarjlarını diğer balıklarınkinden ayırt edemeyen şizofren filbalıkları olabilir mi? "Bu kesinlikle mümkün," diyor Carlson. "Böyle bir durumda, davranışlarında çarpıcı bozulmalar olmasını beklerdim."

kendi oluşturduklarımız ve başkasının oluşturdukları şeklinde ayırma sürecidir."

Bu ayırma süreci, bilinç ya da herhangi bir ileri zihinsel yeti gerektirmez. "Evrim sırasında hoşluk olsun diye sonradan eklenmiş bir şey değildir," diyor Hendricks. Bu özellik, birkaç yüz nörondan ibaret sinir sistemlerinde de bulunur, milyarlarca nöron içerenlerde de. Hayvan varoluşunun en basit algılama ve hareket eylemlerinden kaynaklanan temel bir koşuludur. Hayvanlar kendilerini anlamlandırmadan etraflarında olan biteni anlamlandıramaz. Bu da bir hayvanın Umwelt'inin sadece duyu organlarının değil, uyum içinde çalışan bütün sinir sisteminin ürünü olduğu anlamına gelir. Duyu organları tek başına hareket etseydi hiçbir şeyi anlamlandırmak mümkün olmazdı. Bu kitapta duyuları ayrı ayrı bölümler halinde inceledik. Ancak onları gerçekten anlamak için hepsini bir bütünün parçası olarak düşünmemiz gerekiyor.

Haziran 2019'da yapılan Dünya Bilim Festivali'ndeki hayvan zekâsıyla ilgili bir panel tartışmasına, psikolog Frank Grasso, Qualia adlı iki benekli bir ahtapot getirmişti. Hayvana, içinde lezzetli bir yengeç bulunan siyah kapaklı bir kavanoz verdi. Qualia'nın kapağı açıp yengeci çıkaracağını umuyordu; birçok ahtapotun yapabildiği bir numaradır bu ve çoğunlukla zekâlarının bir delili olarak sunulur. Qualia zamanında pek çok kavanozun kapağını açmıştı ama Grasso, ahtapotun bunu yapmak yerine "surat asıp köşede takılmaya karar verebileceği" konusunda seyirciyi uyardı. Qualia tabii ki öyle yaptı. Tıpkı bir ay sonra, Grasso'yu New York'taki laboratuvarında ziyaret ettiğimde yaptığı gibi.

Qualia eskiden yabancılar içeri girdiğinde tankın önüne doğru yüzüyordu ama yaşlandıkça bir köşeye çekilir olmuştu. Bir başka iki benekli ahtapot olan Ra ise laboratuvarın ilgi odağı olarak onun yerini almıştı. Ra vantuzlarını cama bastırarak tankın bir ucundan diğer ucuna yan yan ilerliyor. Grasso'nun lisans öğrencilerinden ikisi, içinde yengeç bulunan bir kavanozu tanka bırakınca Ra hızla onun üzerine iniyor. Kollarının arasındaki perde kavanozun kapağını sarıyor, ahtapotun rengi koyulaşıyor... ve sonra hiçbir şey olmuyor. İlgisini kaybetmiş gibi görünen Ra hızla uzaklaşıyor. Daha sonra tek kolunu uzatıp kavanoza dokunuyor ama hemen ardından kolunu geri çekiyor. Ne kavanozun

kapağını açan var ne yengeci yiyen. "Bir dönem ikisi de şişeleri büyük bir hevesle açıyordu," diyor Grasso. Ama şimdi umurlarında değil. Tanka bırakılan bir yengecin üzerine hiç zahmete girmeden çökecekler. Şişeye konmuş yengeçleri de şişeden rahatlıkla çıkarabilirler. Ama yapmıyorlar. Grasso şimdi ahtapotların şişelenmiş yengeçleri görüp göremediğini merak ediyor. "Daha önce kavanozları açmalarının sebebi belki de bu yeni nesneyi merak etmelerinin bir sonucuydu," diyor ve "yuvarlak camdan içeriyi göremedikleri için şişede yengeç olup olmadığını anlayamıyorlar."

Bir ahtapotun kavanoz kapağını niye açtığını ve sonrasında niye açmaktan vazgeçtiğini çözebilmek için Umwelt'ini anlamalıyız. Gözlerini, vantuzlarını ve diğer duyu organlarını sırayla inceleyerek başlayabiliriz. Ama ondan sonra ahtapotun tüm sinir sisteminin nasıl çalıştığını, neredeyse sınırsız esnekliğe sahip bir bedeni nasıl kontrol ettiğini ve beyniyle vücudunun birlikte hareket ederek bir değil, muhtemelen iki Umwelt'i nasıl yarattığını anlamalıyız.

Bir ahtapotun merkezî sinir sistemi yaklaşık 500 milyon nöron içerir;[29] diğer tüm omurgasızlarınkini gölgede bırakan bu sayı, küçük memelilerinkiyle karşılaştırılabilir düzeydedir.* Ancak bu nöronların yalnızca üçte biri hayvanın başında, merkezî beynin ve onun yanındaki, gözlerden enformasyon alan optik lopların yapısında yer alır. Geriye kalan 320 milyon nöron kollarda bulunur. Her kolun "diğer kollarla pek az iletişim kuruyormuş gibi görünen, geniş ve nispeten eksiksiz bir sinir sistemi vardır," diye yazmıştı Robyn Crook. "Bir ahtapotun aslında her birinin kendi gündemi olan dokuz beyni vardır."[30]

Bir koldaki 300 vantuz bile bir ölçüde birbirinden bağımsızdır. Bir vantuz herhangi bir şeyle temas ettiğinde kendini yeniden biçimlendirerek dokunduğu şeyin etrafını mühürler, sonra da emme kuvvetiyle yapışır. O sırada kenarındaki 10 bin mekanoreseptör ve kemoreseptörle aynı anda hem dokunur hem de tat alır.[31] Bizim dilimiz lezzeti ve ağız

* İnsanlarda merkezî sinir sistemi beyin ve omuriliği, çevresel sinir sistemiyse kol ve bacaklarımızda, organlarımızda ve vücudumuzun diğer yerlerinde bulunan sinirleri içerir. Fakat ahtapotta bu ayrım silinir. Brakiyal ve vantuz gangliyonlarındaki sinirler kollarda olduğu halde büyük ölçüde merkezî sinir sisteminin parçasıdır.

hissini ayrı nitelikler olarak algılar ama vantuzun nöral donanıma bakacak olursak bir ahtapot muhtemelen bize benzemez. Onun tat ve dokunma duyuları, sinesteziyi andırırcasına, "muhtemelen ayrılmaz biçimde kaynaşmıştır," diyor Grasso. Vantuz, hissettiği lezzetlere ya da dokulara göre ya emmeye devam eder ya da bırakır. Dahası, bu kararı kendi başına verebilir çünkü her vantuzun kendi mini-beyni –vantuz gangliyonu denen bir nöron kümesi– vardır. Balıklara sıkı sıkı yapıştığı halde aynı ahtapotun diğer kollarına asla yapışmayan bu bedenden azade kolları seyrederken vantuzların bağımsız davrandığı açıkça görülür.[32]

Her vantuz gangliyonu, kolun merkezindeki brakiyal gangliyon denen bir başka nöron kümesine bağlanır. Bütün brakiyal gangliyonlar, kol boyunca devam eden uzun bir sıra oluşturacak şekilde birbirine bağlanır. Onları vantuz gangliyonlarının minik ampullere benzediği küçük süsleme ışıkları gibi düşünün. Vantuz gangliyonları birbirleriyle iletişim halinde değilse de brakiyal gangliyonlar öyledir. Vantuzların eşgüdümünü ve bütün bir kolun belli bir düzen içinde hareket etmesini sağlarlar. Brakiyal gangliyonlar, merkezî beyni işe karıştırmadan kendi başına birçok iş yapabilir. Kol, uzanıp nesneleri kavramak ve çekmek için gereken bütün sinir devrelerine sahiptir. Örneğin nörobiyolog Binyamin Hochner, ahtapot bir nesneye dokunduğunda biri temas noktasından, diğeriyse tabandan olmak üzere iki nöral sinyal dalgasının kol boyunca ilerlediğini keşfetti.[34] Bu iki dalganın buluştuğu yerde kol, nesneyi ahtapotun ağzına yönlendirmek için kıvrılarak geçici bir dirsek oluşturur. "Kollarda çok fazla bilgi ve davranış depolanmıştır," diyor Grasso.*

Merkezî beyin kolları kontrol *edebilir* ama gevşek bir patrondur. Mikro yönetimden hoşlanmaz ama sekiz kişilik ekibini gerektiğinde koordine eder. Bir kol tek başına, yarı saydam bir labirentte tat-dokunma duyusunu kullanarak, vücudun geri kalanından herhangi bir veri gelmeksizin yolunu bulabilir. Ancak Hochner'ın meslektaşı Tamar Gutnick, ahtapotların, kollarını şaşırtan sorunları da çözebildiğini gösterdi.[35] Tasarladığı yarı saydam labirentte doğru yol, kolu sudan çıkmaya

* 1950'lerde ve 1960'larda, Martin Wells, bazı ahtapotların beyinlerinden büyük parçalar çıkarıp bu "deserebre" hayvanların nesneleri hareket ettirmek, istiridyeleri açmak ve beslenmek için yine de vantuzlarını kullanabildiğini gösterdi.

zorlayarak kimyasal ipuçlarından yoksun bırakıyordu. Ahtapotlar kollarını gözlerinin yardımıyla yönlendirerek yolu yine de bulabilmişti ama yaptıkları şey onlara doğal gelmiyordu. Bunu öğrenmeleri biraz zaman aldı, hatta yedi ahtapottan biri asla öğrenemedi.

Hochner'ın ekibinin bir diğer üyesi olan Letizia Zullo, merkezî beynin örgütlenme biçiminde kolların özerkliğine dair daha fazla delil buldu.[36] İnsan beyni, vücudun kaba haritalarını içerir. Vücudun farklı yerlerinden, örneğin parmakların her birinden gelen dokunsal duyumsamalar ayrı nöron kümelerince işlenir. Benzer şekilde, belli hareketleri beynin ayrı bölümleri yönlendirir: Sağdaki noktayı uyarırsanız kolunuz havaya kalkabilir ya da eliniz öne uzanabilir. Ama Zullo bir ahtapotta bu tür haritaların olmadığını keşfetti. Ahtapotun beyninde kollardan birinin uzanmasını sağlayan kısmı her uyardığında diğer kollar da uzanıyordu. Benim, sağ elimin işaretparmağının az önce Y tuşuna bastığını bilmem gibi, bir ahtapot da birinci kolundaki on ikinci vantuzun bir yengece dokunduğunun farkında mıdır? Belki de değildir! Belki de hayvan sadece, birinci kolunun besin bulduğunu biliyor ve diğer ayrıntıları kolun kendisine bırakıyordur. Bedenimi bakmadan kafamda canlandırabildiğim gibi, ahtapot da uzuvlarının nerede olduğunu biliyor mu? Belki de bilmiyor! Kollarında hareketlerinin eşgüdümlü olmasına yardım eden propriyoseptörler var elbette ama bu eşgüdüm bütünüyle yerel olabilir. Ahtapot araştırmasının öncülerinden müteveffa Martin Wells, bu hayvanların aslında uzuvlarının nerede olduğuna dair bir algıya ya da şekline dair içsel bir imgeye sahip olmadığına inanıyordu.

Belki bu da yeterince iyidir. İnsan beyninin insan vücudunu kontrol etmesi nispeten kolaydır çünkü kemiklerimiz ve eklemlerimiz hareketlerimizi kısıtlar. Yaptığımız hareketlerin, örneğin bir kupayı tutup kaldırmanın yolları sınırlıdır. Fakat filozof Peter Godfrey-Smith'in *Başka Zihinler* adlı kitabında yazdığı gibi, bir ahtapot "saf olasılıktan müteşekkil bir bedene" sahiptir.[37] Sert gagası dışında yumuşaktır, rahatça bükülebilir ve şekilden şekle girebilir. Derisi bir anda renk ve desen değiştirebilir. Kolları uzanıp geri çekilebilir, kıvrılabilir, boylu boyunca her noktasında dönebilir ve basit hareketleri bile sonsuz farklı biçimde gerçekleştirebilir. Bir beyin, büyük bile olsa böylesine sınırsız seçeneği nasıl takip edebilir? Bu sorunun konuyla ilgisi olmadığı anlaşıldı.

Beynin bunu yapması gerekmez. Ara sıra ufak desteklemelerle yol göstermesi dışında, kolları çoğu zaman kendi haline bırakır.*

O halde ahtapotun muhtemelen *iki* ayrı Umwelt'i var.[39] Kolları, tat ve dokunma dünyasında yaşar ama başında görme duyusu hâkimdir. Bu ikisi arasında karşılıklı bir sohbet olduğu muhakkak ama Grasso, baş ile kollar arasındaki alışverişte bilginin sadeleştirildiğinden şüpheleniyor. Ahtapotun vücudu, hayvan bedenini, duyu pencereleri olan bir eve benzeten Uexküll'ün bu metaforunu genişleterek, aralarında küçük bir bağlantı kapısı bulunan, tamamen farklı mimari tarzlara sahip iki yarı müstakil evden oluşur. Nagel'ın düşündüğü gibi, yarasa olmanın nasıl bir şey olduğunu boş verin. Ahtapot olmanın nasıl bir şey olduğunu nasıl bilebiliriz? Bu hayvanın sıradışı duyuları kadar, o duyuları bir araya getirme şekli de hayal gücümüzü zorlar. İpliği alışılmadık, örgüsü egzotik, kumaşı bize tamamen yabancıdır.

Duyumsama eyleminin, duyuların nasıl çalıştığını anlamamızı zorlaştıran bir yanılsama yaratması ironiktir. Qualia ile Ra'ya bakarken, gözlerimde fotoreseptörlerin ateşlendiğini fark etmedim. Sadece gördüm. Tanklarına dokunurken, parmaklarımda basınca tepki veren mekanoreseptörleri hissetmedim. Sadece dokunduğumu hissettim. Dünyayla ilgili deneyimlerimiz, onları üreten duyu organlarıyla herhangi bir bağlantısı yokmuş hissi verir ve bu da onların, fiziksel gerçeklikten sıyrılmış saf zihinsel yapılar olduğuna inanmamızı kolaylaştırır. Bu yüzden hikâyelerimiz ve mitlerimiz, İskandinav tanrısı Odin ya da bir zamanların popüler dizisi *Game of Thrones*'taki Bran gibi, bilincini hayvan bedenlerine aktarabilen karakterlerle doludur. İnsanların, diğer hayvanların duyusal dünyasına kelimenin gerçek anlamıyla adım attığı bu örnekler, Umwelt kavramını anlamada son noktaymış gibi görünür. Ama aslında kavramı temelde yanlış anlar. Bir hayvanın duyusal dünyasını, gerçek uyaranları algılayan ve zincirleme elektrik sinyalleri üreten, elle tutulur dokular yaratır. O dünya bedenden ayrı değil, ona dairdir. İnsan zihninin, bir yarasanın

* Godfrey-Smith merkezî beyni bir orkestra şefine, kollarıysa "doğaçlamaya yatkın, yönlendirmeyi ancak bir yere kadar kabul eden caz müzisyenlerine" benzetir.[38]

ya da ahtapotun vücudunda nasıl çalışacağını hayal bile edemezsiniz çünkü zaten *çalışmayacaktır*.

Qualia ve Ra, yengeç dolu kavanozları açmaya başladıklarında, bir problemi belli bir amaçla bile isteye çözüyormuş gibi görünüyorlardı. Ama acaba merkezî beyin işe karışıyor muydu yoksa kollar bu yeni nesneleri kendi kendine mi inceliyordu? İkincisi doğruysa ahtapotun davranışı göründüğü kadar zekice değil midir yoksa ahtapotun zekâsı, kollarının özerk merakı sayesinde mi görünür hale gelir? (Bir ahtapotun kolları merak edebilir mi?) Qualia ve Ra kavanozları açmaktan vazgeçtiklerinde, *onlar* mı sıkılmıştı yoksa *kolları* mı? (Bir ahtapotun kolları sıkılabilir mi?) Bu hayvanların ikili Umwelt'leri –gözlerinin gördüğü ile kollarının dokunup tattığı şeyler– arasında bir çelişki var mıydı?

Bunlar yanıtlanması olağanüstü güç sorular ama ahtapotun her yerine ayrı ayrı baktığımızda yanıtlanması iyice imkânsız hale gelir. Vantuzlarının ya da gözlerinin işleyişi, bize hayvanın bütününün neyi algıladığını söyleyemez. Sinir sisteminin yapısını bilmeden, bir hayvanın bedensel hareketlerini kolayca yanlış yorumlayabiliriz. İşte bu yüzden Nagel'ın, bir başka canlının bilinçli deneyimini hayal etme çabası insanı çileden çıkarır: Başka bir hayvan olmanın nasıl bir şey olduğunu bilebilmek için onunla ilgili hemen her şeyi bilmek zorundayız. Bütün duyularını, sinir sistemini ve vücudunun geri kalanını, gereksinimlerini ve çevresini, evrimsel geçmişini ve şimdiki ekolojik durumunu bilmeliyiz. Bu işe tevazuyla, sezgilerimizin bizi yoldan çıkarmasının ne denli kolay olduğunu bilerek yaklaşmalıyız. Kısmen başarılı bir girişimin bile gizli kalmış harikaları ortaya çıkaracağını bilerek umutla ilerlemeliyiz. Ve zamanımızın dolmak üzere olduğunu bilerek hızlı hareket etmeliyiz.

13.

Sessizliği Kurtar, Karanlığı Koru

Tehdit Altındaki Duyu Manzaraları

Wyoming'de, 310 bin dönümlük Grand Teton Ulusal Parkı'nda insan işi altyapının en büyük parçası, Colter Bay köyündeki bir otoparktır. Otoparkın da ilerisinde, ağaçların arasında Jesse Barber'ın Shiterator (Bokarıtıcı) olarak adlandırdığı pis kokulu bir atık su arıtma tesisi var. Metal tentenin altındaki bir yarıkta, Barber'ın fenerinin aydınlattığı bir küçük kahverengi yarasa sessiz sakin oturuyor. Yarasanın sırtına, pirinç tanesi büyüklüğünde beyaz bir cihaz takılmış. "Radyo vericisi," diyor Barber. Hareketlerini takip edebilmek için yarasaya verici takmış. Bu gece birkaçına daha verici takmak için burada.

Shiterator'ın içinden başka yarasaların cıvıltıları geliyor. Güneş batarken ortaya çıkıyorlar. Ekolokasyondan çok, hatırladıklarına güvenerek uçarken Barber'ın iki ağaç arasına gerdiği büyük sis ağını fark etmiyorlar. Birkaçı ağa dolanıyor. Barber onları ağdan kurtarıyor; öğrencileri Hunter Cole ve Abby Krahling, her birini dikkatle muayene ederek sağlıklı ve verici taşıyabilecek kadar ağır olup olmadıklarına bakıyor. Yarasalardan biri ağzını açıp duyamadığım sonar atışlar yapıyor. Cole, yarasanın iki omzunun arasına bir damla kemik çimentosu sürüyor. Sonra da minik vericiyi yerleştirip çimentonun kurumasını bekliyor. "Bir yarasaya verici takmak, biraz sanat projesi yapmaya benzer," diyor Barber. Birkaç dakika sonra Cole yarasayı en yakındaki ağacın üzerine bırakıyor. Yarasa yukarı tırmanıyor ve

sırtında taşıdığı 175 dolar değerindeki radyo vericisiyle havalanıp ormana doğru uçuyor.

Saat ilerledikçe kesif bir karanlık çöküyor. Ekolokasyon yapan yarasalar için sorun değil. Tepemizde uçan, kulakları keskin baykuş ya da karbondioksitin izini süren ve gömleğimin üstünden beni sokan sivrisinekler için de. Ama Barber ve öğrencileri çalışmalarına ancak böcek bulutlarını çeken kafa lambalarını kullanarak devam edebiliyorlar. İşin garip yanı, Barber'ın burada bulunma nedeni de bu. İnsanların diğer türlere zarar veren çok fazla ışık kirliliği yaratmasından endişelenen, sayıları giderek artan duyu biyologlarından biri o. Burada, ulusal parkın ortasında bile ışık sınırları ihlal edip karanlığa sızıyor. Geçen araçların farlarından, ziyaretçi merkezinin floresan ampullerinden ve park etmiş arabaları çevreleyen elektrik direklerinden etrafa ışık yayılıyor. "Otopark Walmart gibi aydınlatılmış çünkü kimse bunun yaban hayatı üzerindeki etkilerini düşünmemiş," diyor Barber.

Asırlar süren çabalar sonucunda insanlar diğer türlerin duyusal dünyaları hakkında çok şey öğrendi. Ne var ki çok kısa bir sürede bu dünyaları alt üst ettik. Artık türümüzün eylemlerinin tanımladığı ve egemen olduğu jeolojik bir çağ olan Antroposen'de yaşıyoruz. Muazzam miktarlara ulaşan sera gazları salınımıyla iklimi değiştirdik ve okyanusları asitlendirdik. Yerli türlerin yerini istilacı türlerin almasına neden olarak yaban hayatını kıtalar arasında birbirine karıştırdık. Bazı biliminsanlarının "biyolojik yok oluş" çağı adını verdiği, tarihöncesi beş büyük kitlesel yok oluşla kıyaslanabilir düzeydeki bir dönemi başlattık.[1] Ve defter-i kebirdeki zaten moral bozucu bu ekolojik günahlar içinde bir tanesi var ki kolayca anlaşılabilir olduğu halde çoğu zaman göz ardı ediliyor: Duyusal kirlilik. Diğer hayvanların Umwelt'lerine adım atmak yerine, onları kendi yarattığımız uyaranlarla yaylım ateşine tutarak kendi Umwelt'imizde yaşamaya zorladık.[2] Geceyi ışıkla, sessizliği gürültüyle, toprağı ve suyu tanıdık olmayan moleküllerle doldurduk. Hayvanların dikkatini, duyularıyla asıl algılamaları gereken şeylerden uzaklaştırdık, ihtiyaç duydukları ipuçlarını ellerinden aldık ve onları duyusal tuzaklara, ateşe düşen pervaneler misali çektik.

Uçan böceklerin birçoğu, sokak lambalarının ışığına çekilip ölür; onları gökcisimlerinin ışığı sanan böcekler yorgunluğa yenik düşene

kadar lambaların etrafında döner durur. Bazı yarasalar, onların bu kafa karışıklığından faydalanıp yönünü şaşırmış böcek sürüleriyle kendine ziyafet çeker. Barber'ın verici taktığı küçük kahverengi yarasalar gibi yavaş hareket eden türler, belki de baykuşlara daha kolay av olmalarına sebep olduğu için ışıktan uzak durur.[3] Yapay ışıklar, etraflarında yaşayan hayvan topluluklarını, bir kısmını çekip bir kısmını uzaklaştırarak yeniden biçimlendirir ve bunun sonuçlarını öngörmek zordur. Işıktan kaçan yarasalar, habitatları küçüldüğü ve avladıkları böcekler ortadan kaybolduğu için kötü durumda olabilir mi? Işığa çekilen yarasalar bundan geçici olarak faydalansalar da yerel böcek popülasyonlarının azalmasıyla sonunda zarar görüyor olabilir mi? Barber bunu öğrenmek için Ulusal Park İdaresi'ni alışılmadık bir deney yapmasına izin vermeye ikna etmişti.

Barber 2019'da Colter Bay açık otoparkındaki 32 sokak lambasının hepsine renk değiştirebilen ampuller taktı. Bunlar ya böceklerin ve yarasaların davranışların etkileyen beyaz ışık ya da etkilemediği düşünülen kırmızı ışık veren ampullerdi.* Barber'ın ekibi, üç günde bir ışığın rengini değiştiriyor. Lambaların altına asılı huni biçimindeki tuzaklar ışığa gelen böcekleri toplarken, radyo alıcı-vericileri, verici takılmış yarasalardan gelen sinyalleri alıyor. Bu verilerin, normal beyaz ışığın hayvanları nasıl etkilediğini ve kırmızı ışığın geceleyin gökyüzünde bir yeniden yabanlaşma [*rewilding*] etkisi yaratıp yaratmadığını açığa çıkarması bekleniyor.

Cole, ışıkların rengini kırmızıya değiştirerek bana küçük bir gösteri yapıyor. Başlangıçta otopark alanı, sanki bir korku filmine adım atmışız gibi, rahatsız edici derecede cehennemi bir görüntüye bürünüyor. Ama gözlerim ortama alıştıkça kırmızılar çarpıcılığını yitirip hoş denebilecek bir tona bürünüyor. Hâlâ bu kadar çok şey görebiliyor olmamız hayret verici. Arabaları ve çevredeki bitki örtüsünü görebiliyoruz. Yukarı bakınca, lambaların altında daha az böceğin toplandığını fark ediyorum. Daha da yukarı bakınca, gökyüzünü boydan boya kateden

* Bu örüntü 2017'de, Kamiel Spoelstra'nın öncülüğünde, Hollandalı biliminsanlarından oluşan bir ekip tarafından keşfedildi.[4] Bunun üzerine, bir doğa koruma alanının hemen yanındaki Nieuwkoop kasabasında bir mahallede, sokak aydınlatması değiştirilerek yarasa dostu kırmızı LED ampuller kullanılmaya başlandı.

Samanyolu'nu görüyorum. Daha önce Kuzey Yarıküre'de hiç görmediğim, olağanüstü güzel bir manzara bu.

Gökbilimci Pierantonio Cinzano ve meslektaşları 2001'de, dünyadaki ışık kirliliğiyle ilgili ilk atlası hazırladıklarında, dünya nüfusunun üçte ikisinin, geceleri ortamın doğal karanlığa göre yüzde 10 oranında daha aydınlık olduğu, ışık kirliliğinden mustarip alanlarda yaşadığını hesaplamışlardı.[5] İnsanlığın yaklaşık yüzde 40'ı ay ışığına denk daimi bir ışık ortamında, yaklaşık yüzde 25'iyse etrafı dolunaydan fazla aydınlatan yapay bir alacakaranlıkta yaşıyor. Araştırmacıların yazdığına göre, "Onlar için asla 'gece' olmuyor." Ekip 2016'da atlası güncellerken sorun daha da büyümüştü. Artık insanların yaklaşık yüzde 83'ü –Amerikalı ve Avrupalıların yüzde 99'undan fazlası– ışık kirliliğinin olduğu gökyüzünün altında yaşıyordu.[6] Gezegende yapay ışıkla kaplı alanların oranı ve bu alanların parlaklığı her yıl yüzde 2 oranında artıyor.[7] Birçok yerde yıldızları örtecek kadar kalın olan parlak bir sis artık Dünya yüzeyinin dörtte birini kaplıyor. İnsanlığın üçte birinden fazlası, Kuzey Amerikalıların neredeyse yüzde 80'i artık Samanyolu'nu göremiyor. Uzmanlık alanı görme duyusu olan Sönke Johnsen, "Milyarlarca yıl uzaktaki galaksilerden gelen ışığın, en yakın alışveriş merkezinden gelen parıltıyla saniyenin milyarda biri kadar bir sürede solup gittiği düşüncesi beni sonsuz bir üzüntüye boğuyor," diye yazmıştı.[8]

Colter Bay'de, Cole ışıkları tekrar beyaza çevirince irkiliyorum. Bu fazladan aydınlık sert ve nahoş. Samanyolu şimdi daha soluk görünüyor, dünya küçülmüş gibi geliyor. Duyusal kirlilik, bağlantıları koparan bir kirliliktir. Bizi kozmostan ayırır. Hayvanlar ile yaşadıkları çevre arasında bağlantı kuran uyaranları bastırır. Gezegeni ışığa ve gürültüye boğarken bir yandan da parçaladık. Yağmur ormanlarını yerle bir ederek ve mercan resiflerini ağartarak duyusal ortamları tehlikeye attık. Bu artık değişmeli. Sessizliği kurtarmak, karanlığı korumak zorundayız.

Her yıl 11 Eylül günü, iki güçlü mavi ışık demeti New York City'de gökyüzünü delip geçer. Anma Işıkları olarak adlandırılan bu yıllık sanatsal enstalasyon, 2001'deki terörist saldırılarında kaybedilenlerin anısına, İkiz Kuleler'in yıkıldığı yerden gökyüzüne yükselir. Demetlerden

her biri için 7 bin watt gücünde 44 ksenon ampul kullanılır. Yaydıkları ışık yaklaşık 100 kilometre uzaktan görülür. Yakından bakanlar çoğu zaman ışık demetlerinin arasında, hafif hafif atıştıran kar taneleri gibi uçuşan küçük benekler görür. Kuşlardır o benekler. Binlerce kuş.

Her yıl yapılan bu tören ne yazık ki milyarlarca küçük ötücü kuşun Kuzey Amerika semalarında uzun bir göç yolculuğuna çıktığı sonbahara rastlar. Karanlığın içinde yol alan kuşlar öylesine kalabalıktır ki radarda bile görünürler. Radar görüntülerini analiz eden Benjamin van Doren, yedi gece boyunca açık tutulan Anma Işıkları'nın yaklaşık 1,1 milyon kuşun yolunu kestiğini gösterdi.[9] Işık demetleri o denli yükseğe ulaşır ki birkaç kilometre yüksekten uçan kuşlar bile bunlara doğru çekilir. Ötleğenler ve diğer küçük türler, ışığın içinde kümelenerek normalin 150 katı yoğunluğa ulaşır. Cisimsiz bir kafese hapsolmuşçasına yavaş yavaş daire çizerler. Sık sık ve çığlık çığlığa öterler. Bazen de civardaki binalara çarparlar.

Göç, küçük kuşların fizyolojik sınırlarını zorlayan yorucu bir iştir. Gece boyu süren dolambaçlı bir yol bile enerji rezervlerini zamanından önce tüketerek ölümcül etki gösterebilir. Bu nedenle, Anma Işıkları'na yakalananların sayısı bini bulduğunda, kuşların yönlerini yeniden bulabilmesi için ışıklar 20 dakikalığına kapatılır. Fakat Anma Işıkları, pek çok ışık kaynağından sadece bir tanesidir; üstelik güçlü ve dikey olmasına rağmen yılda yalnızca bir kez yanar. Oysa stadyumlar ve turistlere yönelik gösteriler, petrol platformları ve iş yerleri her daim ışık saçar. Karanlığın sınırlarını daraltan bu ışık göçmen kuşları kendine çeker. 1886'da, Edison'ın elektrik ampulünü ticarileştirmesinden kısa bir süre sonra bin civarında kuş Decatur, Illinois'de elektrikle aydınlatılan bir kuleye çarparak öldü.[10] Bu olaydan yüzyıl sonra ekolog Travis Longcore ve meslektaşları, ABD ve Kanada'da yılda 7 milyon kuşun haberleşme kulelerine çarparak öldüğünü hesapladılar.[11]* Bu kulelerin pilotları uyarma amaçlı kırmızı ışıkları, gece uçan kuşların yönelimini bozarak aniden rotalarından sapıp tellere ya da birbirlerine çarpmalarına yol

* Daha önce gördüğümüz gibi, göçmen kuşlar yollarını bulmak için çeşitli duyular kullanır. Görünüşe göre haberleşme kulelerine çarpmaları, bütün duyuları aynı anda şaştığı zaman, hava koşulları nirengi noktalarını görmelerini engellerken kırmızı ışıklar pusulalarını devre dışı bıraktığında gerçekleşir.

açar. Sabit ışıklar yerine yanıp sönen ışıklar kullanılarak bu ölümlerin çoğu önlenebilir.[12]

"Dünyayı diğer türlerle aynı şekilde algılamadığımızı çok çabuk unutuyoruz ve dolayısıyla görmezden gelmememiz gereken etkileri görmezden geliyoruz," diyor Longcore. Hayvanlar âleminde en keskin gözlere sahip türlerden biriyiz ama yüksek çözünürlük, kaçınılmaz olarak duyarlılığın düşük olması gibi bir bedel getiriyor. Memelilerin çoğundan farklı olarak bizim görme duyumuz geceleyin yetersiz kalır ve kültürümüz de gündüzcül Umwelt'imizi yansıtır. Işık güvenliği, ilerlemeyi, bilgiyi, umudu ve iyiliği simgeler. Karanlıksa tehlikeyi, durgunluğu, cehaleti, umutsuzluğu ve kötülüğü temsil eder. Kamp ateşlerinden bilgisayar ekranlarına uzanan yolculuğumuzda daha azını değil, hep daha fazlasını arzuladık.* Işığın bir kirletici olarak düşünmek bize çok ters gelse de ışık ait olmadığı zamanlara ve yerlere sızdığında bir kirleticiye dönüşür.

Gezegende sebep olduğumuz değişikliklerin çoğunun doğada bir karşılığı var: Çağımızdaki iklim değişikliği hiç kuşkusuz insan etkisinin bir sonucudur ama gezegenin iklimi, çok daha yavaş işleyen zaman ölçeklerinde doğal olarak da değişir. Fakat gece ışığı, eşi benzeri olmayan, insan kaynaklı bir kuvvettir.[13] Aydınlıkla karanlığın günlük ve mevsimsel ritmi evrim boyunca bozulmadan kaldı ve 4 milyar yıllık bu süreç on dokuzuncu yüzyılda tökezlemeye başladı. Yıldızları görmekte zorlanan gökbilimciler ve fizikçiler, ışık kirliliğinden ilk bahsedenler arasında yer alıyordu. Longcore'un söylediğine göre biyologlar 2000'lerde bu konuya ciddi ciddi eğilmeye başladılar.† Bunun kısmen nedeni, biyologların

---

* Işık kirliliğiyle ilgili bilimsel çalışmalarda, gece yanan yapay ışıklar [*artificial light at night*] için *ALAN* kısaltması kullanmak gibi bir eğilim var. Bu nedenle maalesef birçok makale, tek başına yaban hayatının canına okuyan Alan adlı bir adama pasif agresif bir şekilde bağırıp çağırıyormuş gibi bir izlenim vermekte. Örneğin bir makalede, "ALAN, geceleri aktif olan hayvanları etkileyebilir," yazıyor. Bir başkasındaysa, "Düşük şiddetli ALAN'ın bile belirgin biyolojik etkisi olabilir," deniyor.

† Kuşların aydınlatılmış binalara çarptığı ve yavru kaplumbağaların ışıklı şehirlere doğru ilerlediği daha önce de söyleniyordu. Ancak Longcore, 2002'de düzenlenen bir uluslararası konferansın, konuyla ilgilenen araştırmacıların yüzeysel bilgilerinin tutarlı bir alan haline gelmeye başladığı bir dönüm noktası olduğunu söylüyor.

kendilerinin de gündüzcül olmasıdır.[14] Geceleri uyurken çevrelerinde meydana gelen çarpıcı değişiklikleri inceleyemezler. Oysa, "Gözlerinizi açıp baktığınızda sorun tam karşınızda duruyordur," diyor Longcore.

Deniz kaplumbağası yavruları yuvalarından çıktıktan sonra kumul bitki örtüsünün karanlığından, daha parlak olan okyanus ufkuna doğru ilerler.[15] Fakat aydınlatılmış yollar ve sahildeki tatil beldelerinin yanlış yönlendirmesi sonucunda yırtıcı hayvanlara yem olabilir ya da taşıtlar tarafından ezilebilirler. Yapay ışıklar, sadece Florida'da bile her yıl binlerce kaplumbağa yavrusunun ölümüne sebep olur. Yavruların beyzbol maçlarının ortasına, daha da korkuncu, söndürülmeden bırakılmış kamp ateşlerine daldığı görülmüştür. Bir bekçi, cıva buharlı ampul takılmış tek bir lambanın dibinde yığın halinde yüzlerce ölü yavru bulmuştur.

Yapay ışıkların ölümcül olabilen çekiciliği, böceklerin küresel ölçekte endişe verici azalmasında rol oynuyor olabilir.[16] Tek bir sokak lambası 23 metre öteden güveleri kendine çekebilir, iyi aydınlatılmış bir yol onlar için hapishaneye dönüşebilir.[17] Sokak lambalarının etrafında toplanan böceklerin çoğu büyük olasılıkla güneş doğana kadar ya birilerine yem olur ya da yorgunluktan ölür. Araç farlarına yaklaşanların ömrü muhtemelen daha da kısadır. Bu kayıpların sonuçları ekosistemleri ve günün diğer saatlerini etkileyebilir. 2014 yılında ekolog Eva Knop, bir deneyin parçası olarak İsviçre'deki yedi çayıra sokak lambaları yerleştirdi.[18] Günbatımından sonra gece görüş gözlüğüyle bu alanlarda dolaşarak çiçeklerin üzerinde güveleri ve diğer polen taşıyıcıları aradı. Knop, bu bölgeleri karanlıkta kalan yerlerle karşılaştırarak, tozlaştırıcı böceklerin aydınlatılan çiçekleri yüzde 62 oranında daha az ziyaret ettiğini gösterdi. Bitkiler arılar ve kelebekler tarafından gündüz vardiyasında ziyaret edildiği halde meyve verimi yüzde 13 oranında azalmıştı.

Önemli olan yalnızca ışık olup olmaması değil, aynı zamanda ışığın doğasıdır. Mayıssinekleri ve yusufçuklar gibi larvaları suda yaşayan böcekler, yumurtalarını beyhude bir çabayla ıslak yollara, pencerelere ve arabaların üzerlerine bırakır, çünkü bu yüzeyler yatay polarize ışığı su kütleleriyle aynı şekilde yansıtır.[19] Kırpışan ampuller, gözlerimizin genellikle bu değişiklikleri tespit edemeyecek kadar yavaş olmasına rağmen baş ağrılarına ve başka nörolojik sorunlara neden olabildiğine göre böcekler ve küçük kuşlar gibi daha hızlı görüşe sahip hayvanlara kimbilir neler yapıyordur.[20]

Renkler de önemlidir. Kırmızı, göç eden kuşları rahatsız edebilir ama yarasalar ve böcekler için daha iyidir.* Sarı, böceklerin ve kaplumbağaların rahatını bozmaz ama semenderleri rahatsız edebilir. Longcore'a göre, hiçbir dalgaboyu mükemmel değilse de mavi ve beyaz en kötüsüdür. Mavi ışık biyolojik saati bozar ve böcekleri kuvvetle kendine çeker. Ayrıca kolayca saçıldığından ışık kirliliğinin yayılmasını artırır. Fakat ucuz ve verimlidir. Yeni nesil enerji tasarruflu beyaz LED ampuller çokça mavi ışık yayar ve eğer bütün dünya, geleneksel sarı-turuncu sodyum buharlı ampullerden beyaz LED ampullere geçerse küresel ışık kirliliği iki üç kat artacaktır.[21] "Işığı amaca göre ayarlayarak daha iyi seçimler yapabiliriz," diyor Longcore. "Geceleri tam spektrum kullanmamalıyız. Sürekli gündüz olduğu sinyalini vermekten kaçınmalıyız."

Longcore ile Los Angeles'taki ofisinde konuştuktan sonra kırmızı göz uçuşu† yaparak eve dönüyorum. Uçak kalkarken pencereden ışıl ışıl parlayan şehre bakıyorum. Göz kırpan ışıklar, yıldızlı gökyüzünü ya da ay ışığında parlayan denizi izlerken hissettiğimiz, kökeni çok eskilere dayanan bir huşu duygusu uyandırıyor. İnsanlar ışığı bilgiyle eş tutar. Fikrin simgesi olarak ampul çizeriz; insanlar için parlak zekâlı ya da aydın sıfatlarını kullanır, Karanlık Çağ'dan Aydınlanma Çağı'na geçtiğimizi söyleriz. Ama Los Angeles aşağıda giderek küçülürken o tanıdık huşu duygusuna tedirginlik karışıyor. Işık kirliliği artık sadece kentsel bir sorun değil. Işık seyahat eder, normalde insan etkisine maruz kalmayan korunmuş yerlere bile metastaz yapar. Los Angeles'tan çıkan ışık, 320 km öteye, kıta ABD'sinin en büyük ulusal parkı Ölüm Vadisi'ne ulaşır. Gerçek karanlığı bulmak giderek zorlaşıyor.

Gerçek sessizliği de.

***

* Barber'ın Grand Teton Ulusal Parkı'nda kullandığı kırmızı ışıklar, göçmen kuşların yolunu kesecek kadar yüksekte olmadığından bir sorun oluşturmasa gerek.

† Batıdan doğuya yapılan ve gece geç saatlerde başlayıp sabah sona eren 3-5 saatlik uçuşlar için kullanılan terim. Bu tür uçuşlar hem uyumaya fırsat verecek kadar uzun olmamalarından hem de saat dilimi değişikliğinden ötürü uykusuzluğa, yorgunluğa ve gözlerde kızarmaya neden olur. (*ç.n.*)

Colorado'nun Boulder şehrinde güneşli bir nisan sabahı, deniz seviyesinden 1800 metre yükseklikte bir kayalık yamaca tırmanıyorum. Sadece kozalaklı ormanların panoramik manzarası nedeniyle değil, aynı zamanda huzur dolu sessizliğinden ötürü, dünya daha büyükmüş gibi geliyor. Şehrin gürültü patırtısından uzaktayken, daha zor duyulan sesler ortaya çıkıyor ve daha uzak mesafelerden işitilebilir hale geliyor. Yamaçta bir çizgili sincap hışırdıyor. Çekirgeler uçarken kanatları birbirine çarpıyor. Yakınlarda bir ağaçkakan gagasıyla bir ağacın gövdesini deliyor. Rüzgâr esiyor. Ne kadar uzun süre otururum o kadar çok şey duyuyor gibiyim.

İki adam huzuru bozuyor. Onları göremiyorum ama aşağıda bir yerdeler, fikirlerini tüm Colorado'ya yayınlama niyetindeler. Daha uzakta, ağaçların ardında kalan otoyolda yaklaşan araçların sesini duyabiliyorum. Uzaktan, Denver'ın zihnimden bir türlü uzaklaştıramadığım uğultusu geliyor. Motorları gürleyen bir uçak tepemizden geçiyor. Yürüyüşten sonra buluştuğum Kurt Fristrup, "Altmışlı yılların ortalarından beri sırt çantasıyla geziyorum ve bu süre içinde uçak sayısı altı yedi kat arttı," diyor. "Arkadaşlarım ziyarete geldiğinde, yapmayı en sevdiğim numaralardan biri, yürüyüşün sonunda hiç uçak sesi duyup duymadıklarını sormaktır. Bir iki tanesini hatırlarlar. Bense yirmi üç jet ve iki helikopter duyduğumu söylerim."

Fristrup, Ulusal Park Hizmetleri'nin (NPS), ABD'nin doğal ses manzaralarını (ve başka şeyleri) korumaya çalışan Doğal Sesler ve Gece Gökyüzü Bölümü'nde görevli. Ekibin öncelikle ses manzaralarının haritasını çıkarması gerekiyordu ama ışığın aksine ses, uydular tarafından saptanamaz.[22] Fristrup ve meslektaşları, kayıt donanımlarını ülke genelinde 500 civarında bölgeye taşımak için yıllarca uğraştılar ve yaklaşık 1,5 milyon saatlik ses kaydı yaptılar. İnsan faaliyetinin, koruma altındaki alanların yüzde 63'ünde arkaplan gürültü düzeylerini iki kat, yüzde 21'indeyse on kat artırdığını buldular. NPS'den Rachel Buxton, bu yüzde 21'lik kesimde, "Daha önce 30 metre öteden duyabildiğiniz bir sesi şimdi ancak 3 metre öteden duyabilirsiniz," diyor. Bunun temel sorumlusu uçaklar ve yollar olsa da petrol ve gaz sondajının, madencilik ve ormancılık gibi endüstriyel faaliyetlerin de rolü var. En sıkı korunan alanlar bile akustik kuşatma altında.[23]

Kasabalarda ve şehirlerde sorun daha da büyük; üstelik bu sadece ABD için geçerli değil. Avrupalıların üçte ikisi hiç dinmeyen yağmur sesine eşdeğer bir ortam gürültüsüne maruz kalıyor.[24] Bu tür koşullar, çağrılar ve ötüşler yoluyla iletişim kuran birçok hayvan için zorlayıcıdır. 2003'te Hans Slabbekoorn ile Margriet Peet, Hollanda'nın Leiden kentindeki gürültülü mahallelerde büyük baştankaraların daha yüksek frekanslarda ötmek zorunda kaldığını, böylece notalarının şehrin pes gürültüsü tarafından maskelenmediğini keşfettiler.[25] Bir yıl sonra Henrik Brumm, Almanya'nın Berlin kentindeki bülbüllerin, şehrin hengâmesi içinde seslerini duyurmak için daha yüksek sesle şakımak zorunda kaldığını keşfetti.[26] Bu etkili çalışmalar, gürültü kirliliğiyle ilgili bir araştırma dalgası başlattı; bu araştırmalar da kentsel ve endüstriyel gürültünün, kuş korosunun zamanlamasını değiştirebildiğini, ötüşlerinin karmaşıklığını baskılayabildiğini ve kuşların eş bulmasını engelleyebildiğini gösterdi.[27] Gürültü, şehirde yaşayan kuşlar için bile azap vericidir.

Fristrup, gürültü kirliliğinin hayvanların kasıtlı olarak çıkardığı seslerin yanı sıra, "toplulukları bir arada tutan, kasıtlı çıkarılmayan sesler ağını da" maskelediğini söylüyor. Baykuşlara avlarının nerede olduğunu söyleyen hafif hışırtıları ya da fareleri yaklaşan felaket konusunda uyaran belli belirsiz kanat seslerini kastediyor. Fristrup, "Bunlar ses manzarasının alan ihlaline karşı en savunmasız olduğu bölümlerdir ve biz onları yok ediyoruz," diyor. Ses seviyeleri desibel birimiyle ölçülür; hafif bir fısıltı genellikle 30 desibel, normal konuşma 60, bir rock konseriyse yaklaşık 110 desibel şiddetindedir. Fazladan her 3 desibel, doğal seslerin duyulabileceği menzili yarıya indirilebilir.[28] Gürültü, bir hayvanın algısal dünyasını daraltır. Büyük baştankaralar ve bülbüller gibi bazı türler bu zor koşullara uyum sağlamaya çalışırken, diğerleri bulundukları yerleri terk eder.

Jesse Barber, Heidi Ware ve Christopher McClure 2012'de bir hayalet yol inşa ettiler.[29] Ekip, Idaho'da göçmen kuşlar için mola yeri işlevi gören bir sırtta, 800 metre uzunluğunda bir hoparlör koridoru kurdu ve geçen arabaların ses kayıtlarını tekrar tekrar çaldı. Olağan kuşların üçte biri bu cisimsiz gürültüden uzak durdu. Kalanların çoğu ısrar etmenin bedelini ağır ödedi. Yırtıcı hayvanların seslerini bastıran lastik ve korna

gürültüsünden ötürü kuşlar, tehlikenin nereden geldiğini ararken daha fazla, yiyecek aramak içinse daha az zaman harcadılar. Zorlu göç yolculuğuna devam ederken daha az kilo alıp zayıf düştüler. Hayalet yol deneyi, yaban hayatının, araçların görüntüsünden ve egzoz kokusundan bağımsız olarak, sadece ve sadece gürültüden de olumsuz etkilenebileceğini göstermesi açısından çok önemliydi. Yüzlerce araştırmada benzer sonuçlara ulaşıldı.* Gürültülü koşullarda çayır köpekleri yeraltında daha fazla zaman geçirir.[31] Baykuşlar saldırı sırasında çuvallar.[32] Asalak *Ormia* sinekleri konak cırcırböceği bulmakta zorlanır.[33] Çalı tavukları üreme alanlarını terk eder (yerinde kalanlarsa daha stresli olur).[34]

Sesler, günün her saatinde, katı engellerden geçerek uzak mesafeler katedebilir. Bu niteliklerinden ötürü ses, hayvanlar için hem mükemmel bir uyaran hem de aynı derecede mükemmel bir kirleticidir. Kirlilik deyince akla ilk gelen, fabrika bacalarından tüten dumanlarla köpük köpük nehirlerden yayılan kimyasallar gibi gözle görülür bozulma işaretleridir. Ancak gürültü, normalde cennet gibi görünen habitatları bozarak yaşam alanlarını yaşanmaz hale getirebilir. Hayvanları normal menzillerinin dışına iten görünmez bir buldozer gibi davranabilir.† İyi de hayvanlar nereye gidecek? Kıta ABD'sinin yüzde 83'ünden fazlasının yola uzaklığı bir kilometrenin altındadır.[36]

Artık denizler bile sessizlik vaat edemiyor.[37] Her ne kadar Jacques Cousteau bir zamanlar okyanusu sessiz dünya olarak tanımlamış olsa da aslında durum hiç de öyle değil. Okyanus kırılan dalgaların ve esen rüzgârların, kabarcıklar çıkaran hidrotermal menfezlerin ve parçalanan buzdağlarının doğal sesleriyle doludur; bunların hepsi suyun altında, havada olduğundan daha uzağa taşınır ve daha hızlı hareket eder. Deniz

* Bir deneyde, şehir seslerine ya da AC/DC müziğine maruz bırakılan uğurböcekleri daha az yaprak biti yiyerek grubun "Rock'n roll gürültü kirliliği değildir" hipotezini çürütmüştü.[30]

† 2017 yazında, ekolog Justin Suraci, Barber'ın deneyini farklı bir biçimde uyguladı ve Santa Cruz Dağları'na yerleştirdiği hoparlörlerden etrafa insan konuşmaları dinletti.[35] Konuşan kişi ister şiir okuyan Suraci, ister nefret kusan Rush Limbaugh olsun, dağ aslanları, vaşaklar ve diğer yırtıcı hayvanlar sesleri duyunca uzaklaştılar. Ne var ki bu, klasik anlamda bir gürültü kirliliği meselesi olmaktan çok, insanların, sesleri diğer avcıların cesaretini kırmaya yeten korkunç süper yırtıcılar olmasıyla ilgilidir.

hayvanları da gürültücüdür. Balinalar şarkı söyler, kurbağa balıkları ve morinalar homurdanır, sakallı foklar ıslığa benzer tiz sesler çıkarır. Büyük kıskaçlarının yarattığı şok dalgalarıyla yakından geçen balıkları sersemleten binlerce kapan karidesi [*snapping shrimp*], mercan resiflerini pastırma cızırtısına ya da pirinç gevreğinin sütteki çıtırtısına benzer seslerle doldurur. İnsanların okyanus sakinlerini ağla ya da kancayla yakalaması, zıpkınlaması sonucunda bu ses manzarası kısmen susturuldu. Diğer doğal seslerse bizim eklediklerimiz –deniz tabanını tarayan trol ağlarının sürtünmesi, petrol ve doğalgaz arama çalışmalarında kullanılan sismik sinyallerin kesik kesik darbeleri, askerî sonarın "ping"leri ve tüm bu şamatanın eşlikçisi olarak her yerde bulunan gemi sesleri– arasında kaybolup gitti.*

Deniz memelileri uzmanı John Hildebrand, ofisinde konuştuğumuz sırada bana, "Ayakkabılarının nereden geldiğini bir düşün," diyor. Ayakkabılarıma bakıyorum; Çin'den gelmiş olmaları hiç şaşırtıcı değil. Bir tanker bu ayakkabıları Pasifik'in bir ucundan diğer ucuna taşırken kilometrelerce uzağa yayılan bir ses çıkarıyordu. İkinci Dünya Savaşı ile 2008 arasında küresel nakliye filosu üç kattan fazla büyüdü ve on kat daha fazla kargoyu daha hızlı taşır hale geldi.[40] Bunun sonucunda, okyanuslardaki düşük frekanslı gürültü seviyeleri 32 kat arttı; Hildebrand'ın, denizlerde pervane öncesi döneme kıyasla zaten yaklaşık 15 desibel artmış olduğundan şüphelendiği gürültü seviyelerine, 15 desibellik bir artış daha eklenmiş oldu. Dev balinalar yüzyıldan uzun yaşayabildiğine göre bugün, sualtında giderek artan gürültüye bizzat tanıklık eden ve şimdiki işitme menzili, eskisinin neredeyse onda birine inmiş bireylerin yaşıyor olması muhtemel.[41] Gece gemiler geçerken kambur balinalar şarkı söylemeyi, orkalar yiyecek aramayı bırakır ve

* Donanma sonarına maruz kalan gagalı balinaların defalarca toplu halde kıyıya vurması, araştırmaları ve hukuki davaları da beraberinde getirdi. Joshua Horwitz, *War of the Whales* adlı kitabında donanma sonarını balinaların kıyıya vurmasıyla ilişkilendiren olayları ve ardından gelen hukuk mücadelesini ustaca anlatır.[38] John Hildebrand "Sonar kullanarak bir gagalı balinanın kıyıya vurmasına neden olabileceğiniz su götürmez bir gerçektir," diyor. "Bunu neden yaptıklarıysa hâlâ bir sır." Sesin onlara fiziksel açıdan zarar verip vermediği ya da delibozuk yüzüp vurgun yemelerine neden olup olmadığı belli değil. Öyle ya da böyle, sonarın onları rahatsız ettiği açık.[39]

gerçek balinalar strese girer.[42] Yengeçler yemekten vazgeçer, mürekkepbalıkları renk değiştirir, damsel balıkları daha kolay yakalanır.[43] "Ofisinizdeki gürültü seviyesini 30 desibel artıracağımı söyleseydim, OSHA* gelip kulak koruyucu takmanız gerektiğini söylerdi," diyor Hildebrand. "Bu denli yüksek seviyelerde gürültüye maruz bıraktığımız deniz hayvanları üzerinde, insanlar üzerinde yapmamıza izin verilmeyecek bir deney yapıyoruz."[44]

Bu kitabın önceki 12 bölümünde, diğer türlerin duyusal dünyaları hakkında asırlar boyunca büyük zahmet çekerek elde ettiğimiz bilgileri özetledik. Fakat bu bilgiyi biriktirirken, onların kökten değişiklikler yaptığımız duyusal dünyalarını yeniden biçimlendirdik. Başka bir hayvan olmanın neye benzediğini anlamaya her zamankinden daha yakınız ama diğer hayvanların kendileri gibi olmalarını her zamankinden daha fazla zorlaştırdık.

Milyonlarca yıldır sahiplerine iyi hizmet eden duyular artık birer dert kaynağına dönüştü. Doğada bulunmayan pürüzsüz dikey yüzeylere çarpan seslerden açık havadakine benzer yankılar döner; yarasaların pencerelere sık çarpmasının nedeni bu olabilir.[45] Bir zamanlar deniz kuşlarını güvenilir bir şekilde yiyeceğe yönlendiren ve deniz yosunlarında bulunan bir kimyasal olan DMS, artık onları insanların okyanuslara boşalttığı milyonlarca ton plastik atığa da yönlendiriyor; belki de deniz kuşlarının tahminen yüzde 90'ının sonunda plastik yutmasının nedeni budur.[46] Manatilerin vücutlarını kaplayan kıllar, suda hareket eden nesnelerin yarattığı akıntıları tespit edilebilir, ancak bu hayvanların bir sürat teknesinden kaçınacak kadar dikkatli olmalarına yetmez; Florida'daki manatilerde meydana gelen ölümlerin en az dörtte birinden tekne kazaları sorumludur.[47] Somon balıkları, nehir suyundaki koku maddeleri sayesinde doğdukları akarsulara geri dönebilir ama bu ancak aynı sudaki pestisitler koku duyularını zayıflatmadığı takdirde mümkündür.[48] Denizin dibindeki zayıf elektrik alanları, köpekbalıklarını gömülü avlarına olduğu kadar yüksek gerilim kablolarına da yönlendirebilir.[49]

* Occupational Safety and Health Administration: İş Sağlığı ve Güvenliği Dairesi. (*ç.n.*)

Bazı hayvanlar modern çağın görüntülerine ve seslerine tahammül edebilir hale gelmiştir. Bazılarıysa bu ortamlarda serpilir. Şehirlerde yaşayan kimi gece kelebekleri (güveler) ışığın çekimine daha az kapılır hale geldi.[50] Kimi örümceklerse tam tersine, ışığın cazibesine kapılan böceklerle kendine ziyafet çekmek için sokak lambalarının altına ağ örmeye başladı.[51] Panama'daki kasabalarda gece ışıkları, kurbağa yiyen yarasaları uzaklaştırarak erkek túngara kurbağalarının şarkılarına, yırtıcıların dikkatini çekme riski olmaksızın daha seksi bölümler eklemelerine olanak tanır.[52] Hayvanlar, bireysel yaşamları boyunca davranışlarını değiştirerek ya da birçok nesil boyunca yeni davranışlar geliştirerek uyum sağlayabilir.

Ama uyum sağlamak her zaman mümkün olmaz. Kuşaktan kuşağa geçişin yavaş olduğu uzun ömürlü türler, yirmi ila otuz yılda bir ikiye katlanan ışık ve gürültü kirliliği seviyelerine ayak uyduracak kadar hızlı evrilemez. Zaten daralan habitatların kıyısına köşesine hapsolmuş canlılar başka bir yere gidemez. Özelleşmiş duyularına bel bağlamış türler Umwelt'lerini baştan aşağı yeniden ayarlayamaz. Duyusal kirlilikle başa çıkmak basit bir alışma meselesi değildir. "Bir sesi duyamıyorsanız birdenbire duyabilir hale gelmenizin mümkün olmadığı gerçeğinin tam olarak anlaşıldığını sanmıyorum," diyor Clinton Francis. "Duyu organınız *bir sinyali algılayamıyorsa* buna alışamazsınız."

Etkimiz, doğası gereği yıkıcı olmasa da çoğunlukla türdeşleştiricidir. Duyusal saldırılarımıza dayanamayan hassas türleri ortadan kaldırırken, arkamızda daha küçük ve daha az çeşitlilikte topluluklar bırakıyoruz. Hayvan Umwelt'lerinin muhteşem çeşitliliğini yaratan dalgalı duyu manzaralarını dümdüz ediyoruz. Doğu Afrika'daki Victoria Gölü'nü düşünün. Bu göl bir zamanlar, hemen hepsi sadece bu gölde yaşayan 500 çiklit balığı türüne evsahipliği yapıyordu. Bu olağanüstü çeşitlilik kısmen ışığa bağlıydı.[53] Gölün daha derin yerlerinde ışık sarı ya da turuncu olma eğilimindeyken, sığ sularda mavi ışık daha fazladır. Bu farklılıklar yerel çiklitlerin gözlerini ve bunun sonucunda çiftleşme öncesi seçimlerini etkilemiştir. Evrim biyoloğu Ole Seehausen, daha derin sularda yaşayan dişi çiklitlerin, daha kırmızı erkekleri tercih ettiğini, sığ sularda yaşayanlarınsa daha mavi erkekleri gözlerine kestirdiğini keşfetti. Birbirinden farklı eğilimler âdeta fiziksel bir bariyer işlevi

görüp çiklitleri, bir spektrumun farklı renklerine böldü. Işıktaki çeşitlilik, görme duyusunda, renklerde ve türlerde çeşitliliğe yol açtı. Ancak geçen yüzyılda çiftlikler, maden ocakları ve kanalizasyon kaynaklı yüzey akışıyla göle dolan besin maddeleri gölü bulanıklaştıran ve boğan alglerin çoğalmasını teşvik etti. Eski ışık gradyanları bazı yerlerde silikleştiğinden çiklitlerin renkleri ve görsel eğilimleri önemini yitirdi ve tür sayısı hızla azaldı. İnsanlar gölün ışığını söndürerek çeşitliliğin duyusal motorunu da devre dışı bıraktı ve bu da Seehausen'ın ifadesiyle, "şimdiye kadar gözlemlenmiş en hızlı, büyük ölçekli yok oluş"a yol açtı.[54*]

Alaycı biri, bir göldeki benzer balık türlerinin azalmasının neden bu kadar önemli olduğunu sorabilir. Ormanlık bir arazide 32 yerine 21 kuş türünün yaşaması bizi niye galeyana getirsin ki? 2020'de bilim yazarı Maya Kapoor, son derece yaygın bulunan kanal yayınbalığına benzeyen ve ABD'nin batısında yaşayan, nesli tehlike altındaki Yaqui yayınbalığıyla ilgili bir hikâyede bu sorular üzerine düşündü.[56] "Gezegende en yaygın bulunan balıklardan birine bu kadar çok benzeyen bir türün kaybının gerçekten de önemli olup olmadığını merak ediyordum," diye yazmıştı Kapoor. "Neden sonra idrak ettim (...) birbirlerinin yerini tutabilirmiş gibi görünmeleri, benim sınırlı anlayışım konusunda, aralarındaki farkların sınırlı olduğuna dair söylediğinden çok daha fazlasını söylüyordu." Kapoor'un yaşadığı aydınlanma, çiklitlerin yanı sıra, yakın akraba olan üyeleri tamamen farklı duyulara sahip olabilecek birçok hayvan grubu için de geçerlidir. Bu türlerin nesli tükenirken Umwelt'leri de ortadan kalkıyor. Yok olan her canlıyla birlikte dünyayı anlamlandırma yollarımızdan birini kaybediyoruz. İçinde yaşadığımız duyusal baloncuklar, bu kayıpların bilgisiyle aramıza girer ama bizi bu kaybın sonuçlarına karşı koruyamaz.

Clinton Francis ile Catherine Ortega, New Mexico'nun ormanlık alanlarında yaşayan Woodhouse çalı kargasının, doğalgaz çıkarmak için kullanılan kompresörlerin gürültüsünden kaçtığını keşfettiler.[57]

---

* Aşırı avlanma ve istilacı Nil levreği nüfusunun hızla artması da Victoria Gölü'ndeki çiklitlerin azalmasında rol oynamıştı.[55] Ancak levrekler azalıp da çiklit sayıları eski haline döndüğünde bile bulanık sulardaki çiklit çeşitliliği çok daha düşük kaldı. Işık koşullarının, Victoria Gölü çiklitlerinin inanılmaz çeşitliliğini açıklayan çeşitli etkenlerden sadece biri olduğunu unutmayın.

Çalı kargası, pinyon çamı ağacının tohumlarını yayar ve tek bir kuş, yılda 3 bin - 4 bin tohum gömebilir. Çalı kargaları ormanlar için o kadar önemlidir ki hâlâ yaşadıkları sessiz bölgelerdeki çam fidanları, terk etmiş oldukları gürültülü bölgelerdekine göre dört kat daha yaygındır. Amerikan yerlileri dahil yüzlerce canlı türüne gıda ve barınak sağlayan pinyon çamları, çevrelerindeki ekosistemin temelini oluşturur. Bu ağaçların dörtte üçünün kaybı felaketle sonuçlanır. Ayrıca yavaş büyüdükleri için "gürültü, bütün ekosistem üzerinde yüzyıldan uzun sürecek sonuçlar doğurabilir," diyor Francis.

Duyuların daha iyi anlaşılması bize doğal dünyayı nasıl kirlettiğimizi gösterebildiği gibi, kurtarmanın yollarına da işaret edebilir. Deniz biyoloğu Tim Gordon, 2016'da doktora çalışmasına başlamak için Avustralya'nın Büyük Set Resifi'ne gitti.[58] Canlı renkleriyle muhteşem görünen mercanların arasında aylarca yüzeceğini düşünüyordu. Oysa Gordon, "Çalışma alanımın bütünüyle yok olduğunu dehşet içinde izledim," diyor. Sıcak hava dalgası yüzünden mercanlar, onlara renk veren ve besin sağlayan simbiyotik algleri dışarı atmak zorunda kalmıştı. Bu ortaklar olmayınca aç kalan ve onları bekleyen ağarma süreçlerinin ilkini ve en kötüsünü yaşayan mercanlar beyaza kesti. Mercan molozlarının arasında şnorkelle dalış yapan Gordon, resiflerin ağarmanın yanı sıra sessizleştiğini de fark etti. Kapan karidesleri artık kıskaçlarını şaklatmıyordu. Papağanbalıkları artık çıtırdamıyordu. Bu sesler normalde yavru balıkların denizde geçirdikleri ilk savunmasız aylardan sonra resiflere geri dönmelerine yardımcı olur. Sessiz resifler eskisi gibi çekici değildi. Gordon, balıkların bozulmuş resiflerden uzak durmaları halinde, normalde yedikleri deniz yosununun kontrolden çıkarak her yanı kaplayacağından ve ağarmış mercanların yeniden serpilmesini engelleyeceğinden korkuyordu. Fakat 2017'de, "geriye dönüp acaba bunu tersine çevirebilir miyiz diye düşündük," diyor.

Gordon ve meslektaşları, mercan molozlarının üzerine yerleştirdikleri hoparlörlerden, sağlıklı resiflerden kaydedilmiş sesleri çaldılar. Ekip, yerel hayvanları araştırmak için birkaç günde bir dalış yapıyordu. "Otuzuncu günde," diyor Gordon, "dalış arkadaşlarımla etrafta dolaşırken, 'Burada büyük bir örüntü var, değil mi?' dediğimi hatırlıyorum."

Kırk gün sonra yaptığı hesaplamalarda şunu gördü: Akustik açıdan zenginleştirilmiş resiflerde, sessiz resiflerdekine kıyasla iki kat daha fazla genç balık ve yüzde elli oranında daha fazla tür yaşıyordu. Bu canlılar, seslerin etkisiyle resiflere yönelmekle kalmamış, oraya yerleşip bir komünite oluşturmuşlardı. Gordon, "Çok güzel bir deneydi," diyor. Bu, doğa koruma cıların "dünyayı, korumaya çalıştığımız hayvanların algılarıyla görerek" neler başarabileceğini gösteren bir örnekti.*

Gerçekçi olmak gerekirse bu, küçük çaplı bir çözümdür: Hoparlörler pahalıya patlar, mercan resifleriyse büyüktür. Karbon salımını azaltmadığımız ve iklim değişikliğinin önüne geçmediğimiz sürece, sesler ne denli çekici olursa olsun mercan resiflerini karanlık bir gelecek bekliyor. Yine de Büyük Set Resifi'nin yarısı ölmüş olduğu için mercanların mümkün olabilecek her türlü yardıma ihtiyacı var. Resife doğal seslerini yeniden kazandırmak, mercanlara savaşma şansı verebileceği gibi onları kurtarma görevini bizim için biraz daha kolay sırtlanılır hale getirebilir.

Gordon'ın deneyini mümkün kılan şey, ekibin her şeye rağmen seslerini kaydedebileceği sağlıklı, ağarmamış mercanlar bulabilmiş olmasıydı. Doğal duyu manzaraları hâlâ var. Son resiften gelen son yankı anılara karışmadan, onları korumak ve eski haline getirmek için hâlâ zamanımız var. Çoğu zaman, ortamdan çıkardığımız uyaranları eklemek yerine, ortama eklediklerimizi çıkarabiliriz ama çevre kirliliği yaratan etkenlerin çoğunda bu lükse sahip değiliz. Radyoaktif atıkların bozunuma uğraması binlerce yıl sürebilir. DDT gibi zor parçalanan kimyasallar yasaklansa bile hayvanların vücudunda uzun zaman kalabilir. Plastik üretimini yarın tamamen durdursak bile mevcut plastikler okyanusları yağmalamaya asırlarca devam edecek. Ama ışıkları kapattığımız anda ışık kirliliği biter. Motor ve pervaneler sustuğu anda gürültü kirliliği diner. Duyusal kirlilik ekolojik anlamda kolay halledilebilir bir durum, gezegenin derhal ve etkili biçimde çözülebilecek nadir sorunlarından

* Aksine, farklı Umwelt'leri göz önüne almayan doğa koruma çalışmaları ters tepebilir. Kaplumbağa yuvalarını rakunlardan ve tilkilerden korumak amacıyla yerleştirilen tel kafesler, yuvaların etrafındaki manyetik alanları bozarak, yumurtadan çıkan yavruların anayurtları olan sahillerin manyetik imzasını öğrenmelerini engelleyebilir.[59]

biridir. Dahası 2020'nin baharında dünya bilmeden bu konuda bir adım attı.

COVID-19 pandemisi yayılırken halka açık alanlar kapatıldı. Uçuşlar iptal edildi. Arabalar park yerlerinde bekledi. Gemi seferleri iptal edildi. Yaklaşık 4,5 milyar insan, yani dünya nüfusunun neredeyse beşte üçü evde kalmaya teşvik edildi. Sonuç olarak birçok yerde karanlık ve sessizlik önemli ölçüde arttı. Uçak seferlerinin ve trafikteki arabaların azalmasıyla Almanya'nın Berlin kentinde aydınlık normalin yarısına indi.[60] Bütün dünyada sismik titreşimlerin şiddeti yarı yarıya azaldı ve aylarca öyle kaldı ki bu, kaydedilmiş en uzun süreli azalmaydı.[61] Alaska'da kambur balinaların sığınağı Glacier Bay'in yanı sıra Kaliforniya, New York, Florida ve Teksas kentlerinde gürültü önceki yıla göre yarı yarıya azaldı.[62]* Normalde boğuk olan sesler daha net duyulur hale geldi. Dünyanın her yerinde, şehirlerde yaşayanlar birdenbire kuş ötüşlerini duymaya başladı. "Herkes, etrafında yaşayan ama daha önce farkına bile varmadığı onca hayvanın yaşadığını fark etti," diyor Francis. "İnsanların bahçelerindeki duyusal dünyaları, COVID öncesi döneme kıyasla artık çok büyük."†

Pandemi, toplumların tahammül ettiği sorunları ve aslında yapmaya hazır olduğu değişiklikleri çeşitli şekillerde ortaya çıkardı. İnsanlar yeterince motive olursa duyusal kirliliğin *azaltılabileceğini* gösterdi. Küresel çapta bir kapanmanın sakatlayıcı sonuçları olmadan da duyusal kirliliği azaltmak mümkün. 2007 yazında Kurt Fristrup ve meslektaşları, Kaliforniya'da Muir Ormanları Ulusal Anıtı'nda basit bir deney yaptılar.[64] Parkın en popüler yerlerini sessiz bölge ilan eden ve ziyaretçileri telefonlarını kapatıp alçak sesle konuşmaya teşvik eden tabelaları gelişigüzel yerleştirdiler. Hiçbir yaptırımın olmadığı bu basit adımlar, parktaki gürültü seviyesini 3 desibel azalttı ki bu, ziyaretçi sayısında 1.200 kişilik bir azalmaya eşdeğerdi.

---

* Davranış ekologu Elizabeth Derryberry, Körfez Bölgesi'ndeki porsuk serçelerinin, 2020 baharında, şehir gürültüsünün azaldığı kapanma döneminde üçte bir oranında sessizleştiğini keşfetti.[63]

† Yakın zamanlarda yaşanmış başka felaketler de gürültü kirliliğini azaltmıştır. 2008'deki finansal çöküşten sonra Kaliforniya açıklarında, 2001'de yaşanan 11 Eylül saldırılarının ardından Kanada'nın Fundy Körfesi'nde gürültü azalmıştı. İkinci değişiklik, görünüşe göre gerçek balinaların stresini de azaltmıştı.

Ne var ki kişisel sorumluluklar toplumsal sorumsuzluğu telafi edemez. Duyusal kirliliği gerçek anlamda azaltabilmek için daha büyük adımlar atılması gerek.[65] Örneğin, binalar ve sokaklar kullanılmadığında, ışıklar kısılabilir ya da tamamen kapatılabilir. Ufkun üzerinde parlamayacak şekilde siperlik koruması yapılabilir. Mavi ya da beyaz LED ampuller yerine kırmızı ampuller takılabilir. Yüzeyi gözenekli, sessiz kaldırımlar yoldan geçen araçların gürültüsünü emebilir. Karada banketler ve suda köpük fileler gibi ses emici bariyerler, trafiğin ve sanayinin gürültüsünü hafifletebilir. Taşıt yolları, önemli yaban alanlarının uzağından geçecek şekilde değiştirilebilir ya da hız sınırı aşağı çekilebilir: 2007'de Akdeniz'deki ticari gemilerin yüzde 12 oranında yavaşlaması bile çıkardıkları gürültüyü yarı yarıya azaltmıştı. Ticari gemilere, halihazırda askerî gemileri susturmak için kullanılan (ve ticari gemileri yakıt açısından daha verimli hale getirecek) daha az ses çıkaran gövde ve pervaneler takılabilir. Elimizde pek çok yararlı teknoloji var zaten. Fakat bunların maliyetini düşürecek ya da toplu dağıtımını sağlayacak ekonomik teşvikler eksik. Duyusal kirliliğe neden olan sanayi kollarına düzenlemeler getirebiliriz ama bunun için yeterli toplumsal iradeye sahip değiliz. "Denizdeki plastik kirliliği berbat görünüyor ve bu konuda herkes endişeli ama denizdeki gürültü kirliliği bizim deneyimlediğimiz bir şey olmadığından kimse isyan etmiyor," diyor Gordon.

Anormal olanı normalleştiriyor, kabul edilemez olanı kabul ediyoruz. Dünya nüfusunun yüzde 80'inden fazlasının ışıkla kirlenmiş gökyüzünün altında, Avrupalıların üçte ikisinin sürekli yağan yağmura eşdeğer bir gürültü ortamında yaşadığını unutmayın. Pek çok kişinin gerçek karanlığın ya da sessizliğin ne hissettirdiğine dair en ufak fikri bile yok. Bu deneyim yoksunluğunda kısır döngüler başlar. Duyusal ortamların kutsallığını bozdukça sonuçlarına alışırız. Hayvanları ötelere ittikçe yokluklarına alışırız. Duyusal kirlilik sorunu büyüdükçe sorunu çözmeye dair isteğimiz de kaybolur. Var olduğunu bilmediğimiz bir sorunu nasıl çözeriz?

Çevre tarihçisi William Cronon 1995'te, "yaban doğayı yeniden düşünmenin vakti geldi," diye yazmıştı.[66] Zehir zemberek bir makalesinde, yaban doğa kavramının, özellikle ABD'de algılandığı haliyle haksız yere

ihtişamla eşanlamlı tutulduğunu savundu. On sekizinci yüzyıl düşünürleri, engin ve muhteşem manzaraların insanlara kendi ölümlülüklerini hatırlattığına ve onları ilahî olana yaklaştırdığına inanıyordu. "Tanrı dağın zirvesinde, uçurumda, şelalede, fırtına bulutunda, gökkuşağında, günbatımındaydı," diye yazmıştı Cronon. "Amerikalıların ilk millî parkları için seçtikleri yerleri –Yellowstone, Yosemite, Büyük Kanyon, Rainier, Zion– düşünmek bile hemen hepsinin bu kategorilerden en az birine uyduğunu anlamaya yeter. O denli yüce olmayan manzaralar koruma altına alınmaya layık görülmüyordu; örneğin ilk kez 1940'lı yıllarda Everglades Millî Parkı'ndaki bir bataklık bu statüye kavuştu ve bugüne kadar tek bir çayır bile millî park statüsüne dahil edilmedi."

Uhrevi ihtişamla eşitlemek, yabanıl doğayı yalnızca seyahat etme ve keşfetme ayrıcalığına sahip olanların erişebileceği uzak bir yermiş gibi gösterir. Doğayı, içinde var olduğumuz bir şey değil, insanlıktan ayrı bir şey olarak tasavvur eder. "Uzaktaki yabanı idealleştirmek çoğu zaman, içinde yaşadığımız ortamı, iyisiyle kötüsüyle evimiz dediğimiz manzarayı idealleştirmemek anlamına gelir," diyor Cronon.

Harfiyen katılıyorum. Doğanın görkemi kanyonlar ve dağlarla sınırlı değil. Görkemi, algının yabanında –bizim Umwelt'imizin dışında kalan, diğer hayvanlarınkine dahil olan duyusal alanlarda– bulmak mümkün. Dünyayı başka duyularla algılamak, tanıdık olanda ihtişamı, sıradan olanda kutsalı bulmaktır. Arıların, çiçeklerin elektrik alanlarını algıladığı; yaprakpirelerinin, bitkilerin sapları aracılığıyla titreşimsel melodiler gönderdiği; kuşların, kmor ve ymorların gizli paletini gördüğü bir bahçe, doğanın harikalarını barındırır. Yüce olanı pandemi yüzünden evden çıkamadığım ve bu kitabı yazdığım dönemde, dışarıdaki ağaçlarda toplanan tetrakromatik sığırcıkları seyreder, köpeğim Typo ile koklama oyunları oynarken buldum. Yaban dediğimiz yer uzakta değil. Hepimiz her daim onun içindeyiz. Yeter ki hayal edelim, tadını çıkaralım ve koruyalım.

Jakob von Uexküll, kenelerin, köpeklerin, küçük kargaların ve eşekarılarının duyularını inceledikten sonra, 1934'te gökbilimcinin Umwelt'i hakkında yazdı.[67] "Devasa optik araçlar kullanarak," diyordu bu benzersiz yaratığın gözleri için, "uzayda en uzak yıldızlara kadar nüfuz

edebilir. Onun Umwelt'inde güneşler ve gezegenler bir tören havasında döner durur." Gökbilimde kullanılan araçlar, hiçbir hayvanın doğal yollardan hissedemeyeceği uyaranları –X-ışınlarını, radyo dalgalarını ve çarpışan kara deliklerden kaynaklanan kütleçekim dalgalarını– yakalar. Bu araçlar, insanın Umwelt'ini evrenin boyutlarına ve başlangıcına dek genişletir.

Biyologların kullandığı araçlar daha mütevazı ölçekli olsalar da sonsuzluğa bir bakış atma şansı verirler. Elizabeth Jakob, sıçrayan örümceklerin bakışlarını izlemek için bir göz takip cihazı kullandı. Almut Kelber, karanlıkta çiçeklerden nektar toplayan fil atmaca güvelerini izlemek için gece görüşü gözlüğü kullandı. Paloma Gonzalez-Bellido katil sineklerin ne kadar hızlı gördüğünü anlayabilmek için yüksek hızlı kameralardan yararlandı. Ket Catania'ysa aynı kameraları yıldız burunlu köstebeklerin dokunma duyusuyla nasıl avlandığını çözebilmek için kullandı. Kurt Schwenk, lazer kullanarak yılanların dilleriyle havada oluşturduğu burgaçları görünür hale getirdi. Donald Griffin bir ultrason dedektörü sayesinde yarasa sonarını keşfetti. Lazerli titreşimölçerler ve yaka mikrofonları, Rex Cocroft'ın yaprakpirelerine kulak misafiri olmasını sağladı. ABD Donanması'nın SOSUS hidrofonları sayesinde Chris Clark, mavi balinaların çağrılarının ne kadar uzağa gidebildiğini doğruladı. Eric Fortune ve elektrikli balıklar üzerinde çalışan diğer araştırmacılar, basit elektrotlar yardımıyla, bıçakbalıklarının ve filbalıklarının darbe sinyallerini dinleyebiliyorlar. Mikroskoplar, kameralar, hoparlörler, uydular, kayıt cihazları, hatta tabanında ıstampa bulunan duvarları kâğıtla kaplı kafesler sayesinde insanlar başka duyusal dünyaları keşfedebildiler. Teknoloji sayesinde görünmez olanı görünür, işitilmez olanı işitilir kıldık.

Başka Umwelt'lere göz atabiliyor olmamız en büyük duyusal becerimizdir. Bu kitabın en başında bahsettiğimiz, filin, çıngıraklıyılanın ve diğerlerinin bulunduğu farazi odaya dönelim. O hayalî canlı hayvan koleksiyonunun bir parçası olan insan –Rebecca– ultraviyole görüş, manyetik algılama, ekolokasyon ve kızılötesi duyudan yoksundu. Ama diğerlerinin neyi duyumsadığını bilebilen ve belki de bunu umursayan tek yaratık oydu.

Bogong güvesi, zebra ispinozunun öterken ne duyduğunu asla bilemeyecek; zebra ispinozu, kara hayalet bıçakbalığının elektrikli

vızıltısını hiçbir zaman hissetmeyecek; bıçakbalığı, mantis karidesinin gözleriyle göremeyecek; mantis karidesi hiçbir zaman bir köpek gibi koklayamayacak ve bir köpek asla yarasa olmanın ne demek olduğunu anlayamayacak. Biz de bunların hiçbirini asla tam anlamıyla yapamayacağız ama yapmaya en fazla yaklaşabilen yegâne hayvan yine biziz. Ahtapot olmanın nasıl bir şey olduğunu asla bilemeyebiliriz ama en azından ahtapotların var olduğunu ve deneyimlerinin bizimkilerden farklı olduğunu biliyoruz. Sabırlı gözlemler ve elimizdeki teknolojilerle, bilimsel yöntemle ve her şeyden önemlisi merakımız ve hayal gücümüzle onların dünyalarına adım atmayı deneyebiliriz. Seçimimiz bu doğrultuda olmalı çünkü bu seçimi yapma şansı, bize bahşedilmiş bir armağandır. Bileğimizin hakkıyla kazandığımız nimet değil, kıymetini bilmemiz gereken bir lütuftur.

Teşekkür

2018'in sonunda eşim Liz Neeley ile Londra'da bir kafede oturmuş, ona ikinci bir kitap yazmayı çok istediğimi ama fikirlerimin tükendiğini anlatıyordum. Liz sabırla dinledikten sonra hayvanların dünyayı nasıl algıladıkları hakkında yazmamı önerdi. Bu tip şeyler çok başımıza gelir.

Bu fikir doğaya duyduğumuz ortak ilgiden doğdu. Kariyerlerimizin doğal bir sonucu olarak ortaya çıktı: Liz, deniz biyolojisi alanında, mercan resif balıklarının görme sistemleri üzerine doktorasına başlamıştı, bense on yılı aşkın bir süredir duyusal biyoloji hakkında yazıyordum. Bu, genellikle görmezden gelinenlerin ya da sesi duyulmayanların hikâyelerini anlatma arzumuzu yansıtıyordu. Liz'e sadece bu kitap fikrinin tohumlarını attığı ve yaratım sürecinde bana destek olduğu için değil, aynı zamanda kitabın özünde yatan değerleri somutlaştırdığı ve bana aşıladığı için de minnettarım. Liz her zaman empati kuran, neşeli ve meraklı biridir ve onu tanıma ayrıcalığına erişen insanlarda da aynı nitelikleri ortaya çıkarır. Onunla zaman geçirdiğinizde, dünyayı ve sakinlerini farklı biçimlerde görürsünüz ve sevgili okur, bu kitabı okurken senin de tam olarak böyle hissetmiş olduğunu umuyorum.

Bu kitabın fikir aşamasından bitmiş ürün haline gelmesine kadar her aşamada öncülük ettikleri için, bu fikrin en başından beri umut vaat ettiğini gören ve hayata geçirilmesine yardımcı olan İngiliz temsilcim ve arkadaşım Will Francis'e,; Amerikalı temsilcim PJ Mark'a; ilk taslakları şekillendiren Amerikalı yayıncım ve entelektüel işbirlikçim Hilary Redmon'a ve ilk müsveddelere açık ve net notlar düşen İngiliz yayıncım Stuart Williams'a içtenlikle teşekkür ederim. İlk kitabım *Mikrobiyota*'da dördünün de emeği vardı ve onlarla tekrar çalışmak yuvaya dönmek

gibiydi. *The Atlantic*'teki editörlerim Sarah Laskow ve Ross Andersen, son yıllarda bana yazma konusunda öğrettikleri her şey için büyük bir övgüyü hak ediyorlar; bu kitap üzerinde doğrudan çalışmış olmasalar da bu sayfalarda derin bir etkileri var. Onlarla birlikte Robert Brenner, Meehan Crist, Tom Cunliffe, Rose Eveleth, Natalie Omundsen, Sarah Ramey, Rebecca Skloot, Beck Smith, Maddie Sofia ve Maryam Zaringhalam, dikkatimi hayvan duyularının keyifli âleminden COVID-19 pandemisinin daha yorucu ve trajik dünyasına çevirdiğim çok zor bir yılda beni ayakta tuttular.

Bu kitabı yazarken, adını sayamayacağım kadar çok biliminsanıyla konuştum; çoğu bana zaman ayırmakta inanılmaz derecede cömert davrandı. Jesse Barber, Bruce Carlson, Rex Cocroft, Robyn Crook, Heather Eisthen, Ken Lohmann, Colleen Reichmuth, Cassie Stoddard ve Eric Warrant'a çeştili bölümlerle ilgili verdikleri önemli geribildirimler ve derin tartışmalarımız için müteşekkirim. Yukarıda saydığım çoğu ismin yanı sıra Whitlow Au, Gordon Bauer, Adriana Briscoe, Astra Bryant, Rulon Clark, Tom Cronin, Molly Cummings, Elena Gracheva, Frank Grasso, Alexandra Horowitz, Martin How, Elizabeth Jakob, Sonke Johnsen, Suzanne Amador Kane, Daniel Kish, Daniel Kronauer, Travis Longcore, Malcolm MacIver, Justin Marshall, Beth Mortimer, Cindy Moss, Paul Nachtigall, Dan-Eric Nilsson, Thomas Park, Daniel Robert, Nicholas Roberts, Mike Ryan, Nate Sawtell, Kurt Schwenk, Jim Simmons, Daphne Soares, Amy Streets, Leslie Vosshall, Karen Warkentin ve George Wittemyer'a bana laboratuvarlarını açtıkları, hayvanlarını ve hayatlarını gösterdikleri için teşekkür ederim. En başında bana cesaret ve çok işime yarayan bir slayt seti veren Matthew Cobb'a, ağrıyla ilgili bölümün ilk aşamalarında bana yardımcı olan Catherine Williams'a, duyuları birleştirmeyle ilgili bölümün şekillenmesindeki yardımlarından ötürü Michael Hendricks'e, görme keskinliğiyle ilgili çalışmalarına dayanarak yarattığı ısmarlama model için Eleanor Caves'e ve tartışmalarımızdan faydalandığım Brian Branstetter, Ken Catania, Kurt Fristrup, Amanda Melin, Nate Morehouse ve Aude Pacini'ye özellikle teşekkür ederim.

Ayrıca, teknolojiyle engellilik kesişimi alanında parlak bir düşünür olan Ashley Shew'e, müsveddeyi büyük bir itinayla okuduğu ve

duyular üzerine yazılmış birçok metne sinsice sızan, engelli ayrımcılığı yapan dil ve fikirlerden kaçınmama yardımcı olduğu için minnettarım. (Metinde kalmış olabilecek tüm hatalar sadece ve sadece bana aittir).

Köpek Finn, çıngıraklıyılan Margaret, liman foku Sprouts, Hugh ve Buffett adlı manatiler, büyük kahverengi yarasa Zipper, elektrikli yayınbalığı Blubby, Qualia ve Ra adlı ahtapotlar ve parmağıma yumruk atan isimsiz mantis karidesiyle tanıştığıma memnun oldum. Son olarak, hayvanlara aklımda olduğu kadar kalbimde ve evimde de yer vermeyi bana öğreten Moro, Ellers, Athena, Ruby, Midge, Ezra, Bingo, Nellie, Bennet, Margaux, Canela, Dolly, Tim, Janet, Clarence, Zako, Whiskey, Caleb, Posey, Tesla, Crosby, Bing, Bear, Buddy, Mickey ve özellikle de canım Typo'ya teşekkür ederim. Burada ismini anmayı unuttuğum diğer tüm iyi köpeklerden (ve kedilerden) özür dilerim. İyi ki okuyamıyorsunuz.

Notlar

GİRİŞ

1. Uexküll, 1909.
2. Uexküll'ün ufuk açıcı çalışmasının modern bir çevirisi *bkz.* Uexküll, 2010.
3. Uexküll, 2010, s. 200.
4. Beston, 2003, s. 25
5. Duyu biyolojisinin temelleriyle ilgili klasik bir çalışma için *bkz.* Dusenbery, 1992.
6. Mugan ve MacIver, 2019.
7. Niven ve Laughlin, 2008; Moran, Softly ve Warrant, 2015.
8. Wehner, 1987.
9. Uexküll, 2010, s. 51.
10. Pyenson ve diğ., 2012.
11. Johnsen, 2017.
12. Macpherson, 2011.
13. Macpherson, 2011, s. 36.
14. Nagel, 1974, s. 438–439.
15. Griffin, 1974.
16. Horowitz, 2010, s. 243.
17. Proust, 1993, s. 343.

1. BÖLÜM

1. Köpekler ve onların koku duyusu hakkında daha fazlası için Alexandra Horowitz'in iki kitabını hararetle öneririm (2010, 2016).
2. Kaminski ve diğ., 2019.
3. Craven, Paterson ve Settles, 2010.
4. Quignon ve diğ., 2012.
5. Craven, Paterson ve Settles, 2010.
6. Steen ve diğ., 1996c.
7. Krestel ve diğ., 1984; Walker ve diğ., 2006; Wackermannová, Pinc ve Jebavý, 2016.
8. Krestel ve diğ., 1984.
9. Hepper, 1988.
10. Hepper ve Wells, 2005.
11. King, Becker ve Markee, 1964
12. Smith ve diğ., 2004.
13. Miller, Maritz ve diğ., 2015.
14. Horowitz ve Franks, 2020.
15. Duranton ve Horowitz, 2019.
16. Pihlström ve diğ., 2005.
17. Laska, 2017.
18. McGann, 2017.
19. Weiss ve diğ., 2020.
20. Darwin, 1871, cilt 1, s. 24.
21. Kant, 2007, s. 270.
22. Majid, 2015.
23. Ackerman, 1991, s. 6.
24. Majid ve diğ., 2017; Majid ve Kruspe, 2018.
25. Porter ve diğ., 2007.
26. Silpe ve Bassler, 2019.

27. Dusenbery, 1992.
28. Koku duyusunun temelleri için *bkz.* Keller ve Vosshall, 2004b.
29. Keller ve Vosshall, 2004b.
30. Ravia ve diğ., 2020.
31. Koku duyusu için *bkz.* Eisthen, 2002; Ache ve Young, 2005; Bargmann, 2006.
32. Firestein, 2005.
33. Keller ve Vosshall, 2004a.
34. Keller ve diğ., 2007.
35. Vogt ve Riddiford, 1981.
36. Kalberer, Reisenman ve Hildebrand, 2010.
37. Atema, 2018.
38. Haynes ve diğ., 2002.
39. Hayvan feromonları için *bkz.* Wyatt, 2015a.
40. Wyatt, 2015b.
41. Wyatt, 2015b.
42. Leonhardt ve diğ., 2016.
43. Tumlinson ve diğ., 1971.
44. Sharma ve diğ., 2015.
45. Monnin ve diğ., 2002.
46. Lenoir ve diğ., 2001.
47. Schneirla, 1944.
48. Yong, 2020.
49. Wilson, Durlach ve 1958.
50. Treisman, 2010.
51. D'Ettorre, 2016.
52. Moreau ve diğ., 2006.
53. McKenzie ve Kronauer, 2018.
54. McKenzie ve Kronauer, 2018.
55. Trible ve diğ., 2017.
56. Forel, 1874.
57. Atema, 2018.
58. Roberts ve diğ., 2010.
59. Schiestl ve diğ., 2000.
60. Wilson, 2015.
61. Niimura, Matsui ve Touhara, 2014.
62. McArthur ve diğ., 2019.
63. Miller, Lensman ve diğ., 2015.
64. von Dürckheim ve diğ., 2018.
65. Plotnik ve diğ., 2019.
66. Bates ve diğ., 2007.
67. Moss, 2000.
68. Hurst ve diğ., 2008.
69. Rasmussen ve diğ., 1996.
70. Rasmussen ve Schulte, 1998.
71. Hurst ve diğ., 2008.
72. Bates ve diğ., 2008.
73. Miller, Hensman ve diğ., 2015.
74. Ramey ve diğ., 2013.
75. Rasmussen ve Krishnamurthy, 2000.
76. Wisby ve Hasler, 1954.
77. Bingman ve diğ., 2017.
78. Owen ve diğ., 2015.
79. Jacobs, 2012.
80. Stager, 1964; Birkhead, 2013; Eaton, 2014.
81. Audubon, 1826.
82. Stager, 1964.
83. Bang ve Wenzel'ın etkisine tarihsel bir bakış için *bkz.* Nevitt ve Hagelin, 2009.
84. Bang, 1960; Bang ve Cobb, 1968.
85. Nevitt ve Hagelin, 2009.
86. Zelenitsky, Therrien ve Kobayashi, 2009.
87. Sieck ve Wenzel, 1969.
88. Wenzel ve Sieck, 1972.
89. Nevitt ve Hagelin, 2009.
90. Nevitt, 2000.
91. Nevitt, Veit ve Kąreiva, 1995.
92. Nevitt ve Bonadonna, 2005.
93. Bonadonna ve diğ., 2006; Van Buskirk ve Nevitt, 2008.
94. Nevitt, Losekoot ve Weimerskirch, 2008.
95. Nevitt, 2008; Nevitt, Losekoot ve Weimerskirch, 2008.
96. Gagliardo ve diğ., 2013.

97. Nicolson, 2018, s. 230.
98. Sobel ve diğ., 1999.
99. Schwenk, 1994.
100. Shine ve diğ., 2003.
101. Ford ve Low, 1984.
102. Schwenk, 1994.
103. Clark, 2004; Clark ve Ramirez, 2011.
104. Durso, 2013.
105. Chiszar ve diğ., 1983, 1999; Chiszar, Walters ve Smith, 2008.
106. Smith ve diğ., 2009.
107. Ryerson, 2014.
108. Baxi, Dorries ve Eisthen, 2006.
109. Kardong ve Berkhoudt, 1999.
110. Baxi, Dorries ve Eisthen, 2006.
111. Pain, 2001.
112. Yarmolinsky, Zuker ve Ryba, 2009.
113. Secor, 2008.
114. de Brito Sanchez ve diğ., 2014.
115. Thoma ve diğ., 2016.
116. Van Lenteren ve diğ., 2007.
117. Dennis, Goldman ve Vosshall, 2019.
118. Raad ve diğ., 2016.
119. Yanagawa, Guigue ve Marion-Poll, 2014.
120. Atema, 1971; Caprio ve diğ., 1993.
121. Kasumyan, 2019.
122. Caprio, 1975.
123. Caprio ve diğ., 1993.
124. Jiang ve diğ., 2012.
125. Shan ve diğ., 2018.
126. Johnson ve diğ., 2018.
127. Toda ve diğ., 2021.
128. Baldwin ve diğ., 2014.
129. Nilsson, 2009.

2. BÖLÜM

1. Cross ve diğ., 2020.
2. Morehouse, 2020.
3. Land'in kendi çalışmaları hakkındaki harika açıklamalar için *bkz.* Land, 2018.
4. Land, 1969a, 1969b.
5. Land, 2018, s. 107.
6. Jakob ve diğ., 2018.
7. Nilsson ve diğ., 2012; Polilov, 2012.
8. Hayvan gözleri için *bkz.* Nilsson, 2009.
9. Stowasser ve diğ., 2010; Thomas, Robison ve Johnsen, 2017.
10. Li ve diğ., 2015.
11. Goté ve diğ., 2019.
12. Johnsen, 2012, s. 2
13. Porter ve diğ., 2012.
14. Porter ve diğ., 2012.
15. *Visual Ecology*, görme duyusu ve onun pek çok kullanımıyla ilgili kolay okunan, muhteşem bir ders kitabıdır; Cronin ve diğ., 2014.
16. Nilsson, 2009.
17. Plachetzki, Fong ve Oakley, 2012.
18. Crowe-Riddell, Simões ve diğ., 2019.
19. Kingston ve diğ., 2015.
20. Arikawa, 2001.
21. Parker, 2004.
22. Darwin, 1958, s. 171.
23. Picciani ve diğ., 2018.
24. Nilsson ve Pelger, 1994.
25. Garm ve Nilsson, 2014.
26. Schuergers ve diğ., 2016.
27. Gavelis ve diğ., 2015.
28. Caro, 2016.
29. Melin ve diğ., 2016.
30. Caro ve diğ., 2019.
31. Hayvanlarda görme keskinliğiyle ilgili mükemmel bir derleme için *bkz.* Caves, Brandley ve Johnsen, 2018.
32. Reymond, 1985; Mitkus ve diğ., 2018.

33. Fox, Lehmkuhle ve Westendorf, 1976.
34. Caves, Brandley ve Johnsen, 2018.
35. Veilleux ve Kirk, 2014; Caves, Brandley ve Johnsen, 2018.
36. Feller ve diğ., 2021.
37. Kirschfeld, 1976.
38. Mitkus ve diğ., 2018.
39. Land, 1966.
40. Speiser ve Johnsen, 2008a.
41. Speiser ve Johnsen, 2008b.
42. Land, 2018.
43. Palmer ve diğ., 2017.
44. Li ve diğ., 2015.
45. Bok, Capa ve Nilsson, 2016.
46. Land, 2003.
47. Sumner-Rooney ve diğ., 2018.
48. Ullrich-Luter ve diğ., 2011.
49. Sumner-Rooney ve diğ., 2020.
50. Carrete ve diğ., 2012.
51. Martin, Portugal ve Murn, 2012.
52. Kuşların görme alanlarıyla ilgili Martin'in birçok makalesine atıfta bulunan bir derleme için *bkz.* Martin, 2012.
53. Martin, 2012.
54. Moore ve diğ., 2017; Baden, Euler ve Berens, 2020.
55. Stamp Dawkins, 2002.
56. Mitkus ve diğ., 2018.
57. Potier ve diğ., 2017.
58. Geniş kapsamlı deneyler için *bkz.* Rogers, 2012.
59. Hanke, Römer ve Dehnhardt, 2006.
60. Hughes, 1977.
61. Hayvan retinalarının bölgeselleşmesiyle ilgili mükemmel bir derleme için *bkz.* Baden, Euler ve Berens, 2020.
62. Mass ve Supin, 1995; Baden, Euler ve Berens, 2020.
63. Mass ve Supin, 2007.
64. Katz ve diğ., 2015.
65. Perry ve Desplan, 2016.
66. Owens ve diğ., 2012.
67. Partridge ve diğ., 2014.
68. Thomas, Robison ve Johnsen, 2017.
69. Meyer-Rochow, 1978.
70. Simons, 2020.
71. Wardill ve diğ., 2013.
72. Gonzalez-Bellido, Wardill ve Juusola, 2011.
73. Gonzalez-Bellido, Wardill ve Juusola, 2011.
74. Masland, 2017.
75. Laughlin ve Weckström, 1993.
76. Hayvanların CFF değerleri için *bkz.* Healy ve diğ., 2013; Inger ve diğ., 2014.
77. Fritsches, Brill ve Warrant, 2005.
78. Boström ve diğ., 2016.
79. Evans ve diğ., 2012.
80. Ruck, 1958.
81. Warrant ve diğ., 2004.
82. O'Carroll ve Warrant, 2017.
83. O'Carroll ve Warrant, 2017.
84. Niven ve Laughlin, 2008; Moran, Softly ve Warrant, 2015.
85. Porter ve Sumner-Rooney, 2018.
86. Porter ve Sumner-Rooney, 2018.
87. Warrant, 2017.
88. Stokkan ve diğ., 2013.
89. Collins, Hendrickson ve Kaas, 2005.
90. Warrant ve Locket, 2004.
91. Okyanusta görmeyle ilgili iki harika derleme için *bkz.* Warrant ve Locket, 2004; Johnsen, 2014.
92. Widder, 2019.
93. Johnsen ve Widder, 2019.
94. Nilsson ve diğ., 2012.
95. Nilsson ve diğ., 2012.
96. Schrope, 2013.

97. Kelber, Balkenius ve Warrant, 2002.

3. BÖLÜM

1. Tansley, 1965.
2. Neitz, Geist ve Jacobs, 1989.
3. Neitz, Geist ve Jacobs, 1989.
4. Renkli görme hakkında mükemmel temel bilgiler için *bkz.* Osorio ve Vorobyev, 2008; Cuthill ve diğ., 2017; Cronin ve diğ., Bölüm 7, 2014.
5. Sıradışı renkli görme için *bkz.* Marshall ve Arikawa, 2014.
6. Sacks ve Wasserman, 1987.
7. Emerling ve Springer, 2015.
8. Peichl, 2005; Hart ve diğ., 2011.
9. Peichl, Behrmann ve Kröger, 2001.
10. Hanke ve Kelber, 2020.
11. Seidou ve diğ., 1990.
12. Maximov, 2000.
13. Neitz, Geist ve Jacobs, 1989.
14. Paul ve Stevens, 2020.
15. Colour Blind Awareness, tarih bilinmiyor.
16. Carvalho ve diğ., 2017.
17. Carvalho ve diğ., 2017.
18. Pointer ve Attridge, 1998; Neitz, Carroll ve Neitz, 2001.
19. Mollon, 1989; Osorio ve Vorobyev, 1996; Smith ve diğ., 2003.
20. Dominy ve Lucas, 2001; Dominy, Svenning ve Li, 2003.
21. Jacobs, 1984.
22. Jacobs ve Neitz, 1987.
23. Saito ve diğ., 2004.
24. Jacobs ve Neitz, 1987.
25. Fedigan ve diğ., 2014.
26. Melin ve diğ., 2007, 2017.
27. Mancuso ve diğ., 2009.
28. Lubbock, 1881.
29. Dusenbery, 1992.
30. UV görüş ve tarihçesiyle ilgili mükemmel bir özet için *bkz.* Cronin ve Bok (2016).
31. Goldsmith, 1980.
32. Jacobs, Neitz ve Deegan, 1991.
33. Douglas ve Jeffery, 2014.
34. Zimmer, 2012.
35. Tedore ve Nilsson, 2019.
36. Marshall, Carleton ve Cronin, 2015.
37. Tyler ve diğ., 2014.
38. Primack, 1982.
39. Herberstein, Heiling ve Cheng, 2009.
40. Andersson, Ornborg ve Andersson, 1998; Hunt ve diğ., 1998.
41. Eaton, 2005.
42. Cummings, Rosenthal ve Ryan, 2003.
43. Siebeck ve diğ., 2010.
44. Stevens ve Cuthill, 2007.
45. Viitala ve diğ., 1995.
46. Lind ve diğ., 2013.
47. Stoddard ve diğ., 2020.
48. Renkli görmeyle ilgili klasik bir makale için *bkz.* Kelber, Vorobyev ve Osorio (2003).
49. Stoddard ve diğ., 2020.
50. Stoddard ve diğ., 2019.
51. Neumeyer, 1992.
52. Collin ve diğ., 2009.
53. Hines ve diğ., 2011.
54. Briscoe ve diğ., 2010.
55. Finkbeiner ve diğ., 2017.
56. McCulloch, Osorio ve Briscoe, 2016.
57. Jordan ve diğ., 2010.
58. Greenwood, 2012; Jordan ve Mollon, 2019.
59. Zimmermann ve diğ., 2018.
60. Koshitaka ve diğ., 2008; Chen ve diğ., 2016; Arikawa, 2017.

61. Patek, Kor ve Caldwell, 2004.
62. Marshall, 1988.
63. Cronin ve Marshall, 1989a, 1989b.
64. Mantis karidesinin görmesiyle ilgili mükemmel bir derleme için *bkz.* Cronin, Marshall ve Caldwell (2017).
65. Marshall ve Oberwinkler, 1999; Bok ve diğ., 2014.
66. Inman, 2013.
67. Thoen ve diğ., 2014.
68. Daly ve diğ., 2018.
69. Marshall, Land ve Cronin, 2014.
70. Land ve diğ., 1990.
71. Marshall ve diğ., 2019b.
72. Temple ve diğ, 2012.
73. Chiou ve diğ., 2008.
74. Daly ve diğ., 2016.
75. Gagnon ve diğ., 2015.
76. Cronin, 2018.
77. Hiramatsu ve diğ., 2017; Moreira ve diğ., 2019.
78. Marshall ve diğ., 2019a.
79. Maan ve Cummings, 2012.
80. Chittka ve Menzel, 1992.
81. Chittka, 1997.

4. BÖLÜM

1. Braude ve diğ., 2021.
2. Park, Lewin ve Buffenstein, 2010; Braude ve diğ., 2021.
3. Catania ve Remple, 2002.
4. Van der Horst ve diğ., 2011.
5. Park ve diğ., 2017.
6. Zions ve diğ., 2020.
7. Park ve diğ., 2017.
8. LaVinka ve Park, 2012.
9. Park ve diğ., 2008.
10. Poulson ve diğ., 2020.
11. Nosisepsiyonla ilgili temel bilgiler için *bkz.* Kavaliers (1988); Lewin, Lu ve Park (2004); Tracey (2017).
12. Smith, Park ve Lewin, 2020.
13. Smith ve diğ., 2011.
14. Liu ve diğ., 2014.
15. Jordt ve Julius, 2002.
16. Melo ve diğ., 2021.
17. Rowe ve diğ., 2013.
18. Sherrington, 1903.
19. Nosisepsiyon ve ağrıyla ilgili mükemmel iki derleme için *bkz.* Sneddon (2018); Williams ve diğ. (2019).
20. Cox ve diğ., 2006; Goldberg ve diğ., 2012.
21. Cox ve diğ., 2006.
22. Cowart, 2021.
23. Sarah Ramey'nin *The Lady's Handbook for Her Mysterious Illness* (2020) ve Maya Dusenbery'nin *Doing Harm* (2018) adlı kitapları bu konuda yazılmış mükemmel eserlerdir.
24. Hayvanlarda ağrı duyusu için *bkz.* Sneddon, 2018.
25. Bateson, 1991.
26. Sullivan, 2013.
27. Sneddon ve diğ., 2014.
28. Anand, Sippell ve Aynsley-Green, 1987.
29. Broom, 2001.
30. Li, 2013; Lu ve diğ., 2017.
31. Sneddon, Braithwaite ve Gentle, 2003a, 2003b.
32. Dunlop ve Laming, 2005; Reilly ve diğ., 2008.
33. Bjørge ve diğ., 2011; Mettam ve diğ., 2011.
34. Sneddon, 2013.
35. Millsopp ve Laming, 2008.
36. Braithwaite, 2010.

37. Rose ve diğ., 2014; Key, 2016.
38. Rose ve diğ., 2014; Key, 2016; Sneddon, 2019.
39. Rose ve diğ., 2014.
40. Braithwaite ve Droege, 2016.
41. Dinets, 2016.
42. Marder ve Bucher, 2007.
43. Garcia-Larrea ve Bastuji, 2018.
44. Adamo, 2016, 2019.
45. Appel ve Elwood, 2009; Elwood ve Appel, 2009.
46. Elwood, 2019.
47. Sneddon ve diğ., 2014.
48. Chittka ve Niven, 2009.
49. Bateson, 1991; Elwood, 2011.
50. Stiehl, Lalla ve Breazeal, 2004; Lee-Johnson ve Carnegie, 2010; Ikinamo, 2011.
51. Hochner, 2012.
52. Avrupa Parlamentosu, Avrupa Birliği Konseyi, 2010.
53. Crook ve diğ., 2011.
54. Crook, Hanlon ve Walters, 2013.
55. Crook ve diğ, 2014.
56. Alupay, Hadjisolomoz ve Crook, 2014.
57. Alupay, Hadjisolomoz ve Crook, 2014.
58. Crook, 2021.
59. Chatigny, 2019.
60. Eisemann ve diğ., 1984.
61. Eisemann ve diğ., 1984.

5. BÖLÜM

1. Geiser, 2013.
2. Daan, Barnes ve Strijkstra, 1991.
3. Andrews, 2019.
4. Matos-Cruz ve diğ., 2017.
5. Matos-Cruz ve diğ., 2017.
6. Hayvanların tahammül edebildiği sıcaklık aralıkları için *bkz.* McKemy (2007); Sengupta ve Garrity (2013).
7. Matos-Cruz ve diğ., 2017; Hoffstaetter, Bagriantsev ve Gracheva, 2018.
8. Hoffstaetter, Bagriantsev ve Gracheva, 2018.
9. Gracheva ve Bagriantsev, 2015.
10. Matos-Cruz ve diğ., 2017.
11. Key ve diğ., 2018.
12. Ho staetter, Bagriantsev ve Gracheva, 2018.
13. Laursen ve diğ., 2016.
14. Gehring ve Wehner, 1995; Ravaux ve diğ., 2013.
15. Hartzell ve diğ., 2011.
16. Corfas ve Vosshall, 2015.
17. Heinrich, 1993.
18. Simões ve diğ., 2021.
19. Wurtsbaugh ve Neverman, 1988; Thums ve diğ., 2013.
20. Bates ve diğ., 2010.
21. Tsai ve diğ., 2020.
22. Du ve diğ., 2011.
23. Schmitz ve Bousack, 2012.
24. Linsley, 1943.
25. Linsley ve Hurd, 1957.
26. Schmitz, Schmitz ve Schneider, 2016.
27. Schütz ve diğ, 1999.
28. Dusenbery, 1992; Schmitz, Schmitz ve Schneider, 2016.
29. Schmitz ve Bleckmann, 1998.
30. Schmitz ve Bousack, 2012.
31. Schneider, Schmitz ve Schmitz, 2015.
32. Schmitz, Schmitz ve Schneider, 2016.
33. Biso ve diğ., 2013.
34. Bryant ve Hallem, 2018; Bryant ve diğ., 2018.

35. Windsor, 1998; Forbes ve diğ., 2018.
36. Lazzari, 2009; Chappuis ve diğ., 2013; Corfas ve Vosshall, 2015.
37. Kürten ve Schmidt, 1982.
38. Gracheva ve diğ., 2011.
39. Carr ve Salgado, 2019.
40. Goris, 2011.
41. Gracheva ve diğ., 2010.
42. Ros, 1935.
43. Noble ve Schmidt, 1937.
44. Kardong ve Mackessy, 1991.
45. Bullock ve Diecke, 1956.
46. Ebert ve Westho, 2006.
47. Hartline, Kass ve Loop, 1978; Newman ve Hartline, 1982.
48. Goris, 2011.
49. Rundus ve diğ., 2007.
50. Bakken ve Krochmal, 2007.
51. Schraft, Bakken ve Clark, 2019.
52. Shine ve diğ., 2002.
53. Chen ve diğ, 2012.
54. Goris, 2011.
55. Bleicher ve diğ., 2018; Embar ve diğ, 2018.
56. Schraft ve Clark, 2019.
57. Schraft, Goodman ve Clark, 2018.
58. Cadena ve diğ., 2013.
59. Bakken ve diğ., 2018.
60. Gläser ve Kröger, 2017; Kröger ve Goiricelaya, 2017.
61. Bálint ve diğ., 2020.

6. BÖLÜM

1. Monterey Bay Akvaryumu, 2016.
2. Kuhn ve diğ., 2010.
3. Costa ve Kooyman, 2011.
4. Yeates, Williams ve Fink, 2007.
5. Radinsky, 1968.
6. Wilson ve Moore, 2015.
7. Strobel ve diğ., 2018.
8. Strobel ve diğ., 2018.
9. Thometz ve diğ., 2016.
10. Dokunma için *bkz.* Prescott ve Dürr, 2015.
11. Çeşitli dokunma sensörleri için *bkz.* Zimmerman, Bai ve Ginty, 2014; Moayedi, Nakatani ve Lumpkin, 2015.
12. Walsh, Bautista ve Lumpkin, 2015.
13. Carpenter ve diğ., 2018.
14. Skedung ve diğ., 2013.
15. Prescott, Diamond ve Wing, 2011.
16. Skedung ve diğ., 2013.
17. Catania'nın yıldız burunlu köstebekle ilgili çalışmaları için *bkz.* Catania (2011).
18. Catania, 1995b.
19. Catania, Northcutt ve Kaas, 1999.
20. Catania ve diğ., 1993.
21. Catania ve Kaas, 1997b.
22. Catania, 1995a.
23. Catania ve Kaas, 1997a.
24. Catania ve Remple, 2004, 2005.
25. Gentle ve Breward, 1986.
26. Schneider ve diğ., 2014, 2017.
27. Birkhead, 2013, s. 78.
28. Schneider ve diğ., 2019.
29. Piersma ve diğ., 1995.
30. Piersma ve diğ., 1998.
31. Cunningham, Castro ve Alley, 2007; Cunningham ve diğ., 2010.
32. Gal ve diğ., 2014.
33. Cohen ve diğ., 2020.
34. Hardy ve Hale, 2020.
35. Seneviratne ve Jones, 2008.
36. Seneviratne ve Jones, 2008.
37. Cunningham, Alley ve Castro, 2011.
38. Persons ve Currie, 2015.
39. Prescott ve Dürr, 2015.

40. Memelilerdeki vibrissa için *bkz.* Prescott, Mitchinson ve Grant, 2011.
41. Bush, Solla ve Hartmann, 2016.
42. Grant, Breakell ve Prescott, 2018.
43. Grant, Sperber ve Prescott, 2012.
44. Arkley ve diğ., 2014.
45. Mitchinson ve diğ., 2011.
46. Mitchinson ve diğ., 2011.
47. Marshall, Clark ve Reep, 1998.
48. Manatilerin bıyıklarıyla ilgili olarak *bkz.* Reep ve Sarko, 2009; Bauer, Reep ve Marshall, 2018.
49. Marshall ve diğ., 1998.
50. Bauer ve diğ., 2012.
51. Crish, Crish ve Comer, 2015; Sarko, Rice ve Reep, 2015.
52. Reep, Marshall ve Stoll, 2002.
53. Gaspard ve diğ., 2017.
54. Hanke ve Dehnhardt, 2015.
55. Murphy, Reichmuth ve Mann, 2015.
56. Dehnhardt, Mauck ve Hyvärinen, 1998.
57. Dehnhardt ve diğ., 2001.
58. Hanke ve diğ., 2010.
59. Wieskotten ve diğ., 2010.
60. Wieskotten ve diğ., 2011.
61. Niesterok ve diğ., 2017.
62. Yanal çizgi için *bkz.* Montgomery, Bleckmann ve Coombs, 2013.
63. Dijkgraaf, 1989.
64. Dijkgraaf, 1989.
65. Hofer, 1908.
66. Dijkgraaf, 1963.
67. Dijkgraaf, 1963.
68. Webb, 2013; Mogdans, 2019.
69. Partridge ve Pitcher, 1980.
70. Pitcher, Partridge ve Wardle, 1976.
71. Webb, 2013.
72. Mogdans, 2019.
73. Montgomery ve Saunders, 1985.
74. Yoshizawa ve diğ., 2014; Lloyd ve diğ., 2018.
75. Patton, Windsor ve Coombs, 2010.
76. Haspel ve diğ., 2012.
77. Haspel ve diğ., 2012.
78. Soares, 2002.
79. Soares, 2002.
80. Leitch ve Catania, 2012.
81. Crowe-Riddell, Williams ve diğ., 2019.
82. Ibrahim ve diğ., 2014.
83. Carr ve diğ., 2017.
84. Kane, Van Beveren ve Dakin, 2018.
85. Kane, Van Beveren ve Dakin, 2018.
86. Necker, 1985; Clark ve de Cruz, 1989.
87. Brown ve Fedde, 1993.
88. Sterbing-D'Angelo ve diğ., 2017.
89. Sterbing-D'Angelo ve Moss, 2014.
90. Barth'ın kaplan gezgin örümceğiyle ilgili çalışmaları için *bkz.* Barth, 2002.
91. Barth, 2015.
92. Seyfarth, 2002.
93. Barth ve Höller, 1999.
94. Klopsch, Kehlmann ve Barth, 2012, 2013.
95. Casas ve Dangles, 2010.
96. Dangles, Casas ve Coolen, 2006; Casas ve Steinmann, 2014.
97. Di Silvestro, 2012.
98. Shimozawa, Murakami ve Kumagai, 2003.
99. Tautz ve Markl, 1978.
100. Tautz ve Rostás, 2008.

7. BÖLÜM

1. Warkentin, 1995.
2. Cohen, Seid ve Warkentin, 2016.

3. Warkentin, 2005; Caldwell, McDaniel ve Warkentin, 2010.
4. Çevreden gelen sinyal üzerine embriyoların yumurtadan çıkması için *bkz*. Warkentin, 2011.
5. Jung ve diğ., 2019.
6. Jung ve diğ., 2019.
7. Caldwell, McDaniel ve Warkentin, 2010.
8. Takeshita ve Murai, 2016.
9. Hager ve Kirchner, 2013.
10. Han ve Jablonski, 2010.
11. Hill, 2009; Hill ve Wessel, 2016; Mortimer, 2017.
12. Hill, 2014.
13. Peggy Hill'in titreşimsel iletişimle ilgili ufuk açıcı metni için *bkz.* Hill, 2008. Alıntı 2. sayfadandır.
14. Böceklerde titreşimsel iletişim için *bkz.* Cocroft ve Rodríguez, 2005; Cocroft, 2011.
15. Cokl ve Virant-Doberlet, 2003.
16. treehoppers.insectmuseum.org.
17. Cocroft ve Rodríguez, 2005.
18. Cocroft, 1999.
19. Hamel ve Cocroft, 2012.
20. Legendre, Marting ve Cocroft, 2012.
21. Eriksson ve diğ., 2012; Polajnar ve diğ., 2015.
22. Yadav, 2017.
23. Hager ve Krausa, 2019.
24. Ossiannilsson, 1949.
25. Brownell'ın kum akrebiyle ilgili anlatısı için *bkz*. Brownell, 1984.
26. Brownell ve Farley, 1979c.
27. Brownell ve Farley, 1979a.
28. Brownell ve Farley, 1979b.
29. Woith ve diğ., 2018.
30. Fertin ve Casas, 2007; Martinez ve diğ., 2020.
31. Mencinger-Vračko ve Devetak, 2008.
32. Catania, 2008; Mitra ve diğ., 2009.
33. Darwin, 1890.
34. Mason, 2003.
35. Lewis ve diğ., 2006.
36. Narins ve Lewis, 1984; Mason ve Narins, 2002.
37. Mason, 2003.
38. Hill, 2008, s. 120.
39. O'Connell'ın fillerle ilgili çalışması için *bkz.* O'Connell, 2008.
40. O'Connell-Rodwell, Hart ve Arnason, 2001.
41. O'Connell-Rodwell ve diğ., 2006.
42. O'Connell, 2008, s. 180.
43. O'Connell-Rodwell ve diğ., 2007.
44. O'Connell, Arnatson ve Hart, 1997; Günther, O'Connell-Rodwell ve Klemperer, 2004.
45. Smith ve diğ., 2018.
46. Phippen, 2016.
47. Standing Bear, 2006, s. 192.
48. Örümcek ipeği ve evrimiyle ilgili mükemmel bir kitap için *bkz*. Brunetta ve Craig, 2012.
49. Agnarsson, Kuttner ve Blackledge, 2010.
50. Blackledge, Kuttner ve Agnarsson, 2011.
51. Masters, 1984.
52. Landolfa ve Barth, 1996.
53. Robinson ve Mirick, 1971; Suter, 1978.
54. Klärner ve Barth, 1982.
55. Vollrath, 1979a, 1979b.
56. Wignall ve Taylor, 2011.
57. Wilcox, Jackson ve Gentile, 1996.
58. Barth, 2002, s. 19.
59. Mortimer ve diğ., 2014.
60. Mortimer ve diğ., 2016.

61. Watanabe, 1999, 2000.
62. Nakata, 2010, 2013.
63. Örümcek ağlarını bilişin uzantısı olarak ele alan harika bir derleme için *bkz.* Japyassú and Laland, 2017.
64. Mhatre, Sivalinghem ve Mason, 2018.

8. BÖLÜM

1. Payne'in peçeli baykuşlarla ilgili çalışması için *bkz.* Payne, 1971.
2. Payne, 1971.
3. Dusenbery, 1992.
4. Konishi, 1973, 2012.
5. Krumm ve diğ., 2017.
6. Knudsen, Blasdel ve Konishi, 1979.
7. Payne, 1971.
8. Carr ve Christensen-Dalsgaard, 2015, 2016.
9. Hayvanlarda işitme duyusuyla ilgili eski ama iyi bir derleme için bkz. Stebbins, 1983. Alıntı 1. sayfadandır.
10. Weger ve Wagner, 2016; Clark, LePiane ve Liu, 2020.
11. Konishi, 2012.
12. Webster ve Webster, 1980.
13. Webster, 1962; Stangl ve diğ., 2005.
14. Webster ve Webster, 1971.
15. Böcek kulakları için *bkz.* Fullard ve Yack (1993); Göpfert ve Hennig (2016).
16. Göpfert ve Hennig, 2016.
17. Robert, Mhatre ve McDonagh, 2010.
18. Göpfert, Surlykke ve Wasserthal, 2002; Montealegre-Z ve diğ., 2012.
19. Menda ve diğ., 2019.
20. Taylor ve Yack, 2019.
21. Yager ve Hoy, 1986; Van Staaden ve diğ., 2003.
22. Pye, 2004.
23. Fullard ve Yack, 1993.
24. Strauß ve Stumpner, 2015.
25. Lane, Lucas ve Yack, 2008.
26. 26 Fournier ve diğ., 2013.
27. 27 Gu ve diğ., 2012.
28. Robert, Amoroso ve Hoy, 1992.
29. Mason, Oshinsky Hoy, 2001; Müller and Robert, 2002.
30. Miles, Robert ve Hoy, 1995.
31. Webb, 1996.
32. Webb, 1996.
33. Zuk, Rotenberry ve Tinghitella, 2006; Schneider ve diğ., 2018.
34. Ryan, 1980.
35. Ryan, 1980.
36. Ryan ve diğ., 1990.
37. Ryan ve Rand, 1993.
38. Ryan ve Rand, 1993.
39. Ryan ve Rand, 1993.
40. Túngara kurbağalarıyla ilgili çalışması için *bkz.* Ryan (2018).
41. Basolo, 1990.
42. Tuttle ve Ryan, 1981.
43. Page ve Ryan, 2008.
44. Bernal,,Rand ve Ryan, 2006.
45. Kuşlarda işitme için *bkz.* Dooling and Prior (2017).
46. Birkhead, 2013.
47. Konishi, 1969.
48. Dooling, Lohr ve Dent, 2000.
49. Dooling ve diğ., 2002.
50. Vernaleo ve Dooling, 2011.
51. Lawson ve diğ., 2018.
52. Dooling ve Prior, 2017.
53. Fishbein ve diğ., 2020.
54. Prior ve diğ., 2018.
55. Lucas ve diğ., 2002.
56. Henry ve diğ., 2011.
57. Lucas ve diğ., 2007.
58. Lucas ve diğ., 2007.

59. Noirot ve diğ., 2009.
60. Gall, Salaamed ve Lucas, 2013.
61. Caras, 2013.
62. Sisneros, 2009.
63. Gall ve Wilczynski, 2015.
64. Kwon, 2019.
65. Payne ve McVay, 1971.
66. Payne ve Webb, 1971.
67. Schevill, Watkins ve Backus, 1964.
68. Narins, Stoeger ve O'Connell-Rodwell, 2016.
69. Payne ve Webb, 1971.
70. Clark ve Gagnon, 2004.
71. Costa, 1993.
72. Kuna ve Náběelek, 2021.
73. Tyack ve Clark, 2000.
74. Goldbogen ve diğ., 2019.
75. Mourlam ve Orliac, 2017.
76. Shadwick, Potvin ve Goldbogen, 2019.
77. Payne'in fillerle ilgili araştırmaları için *bkz.* Payne, 1999.
78. Payne, 1999, s. 20.
79. Payne, Langbauer ve Thomas, 1986.
80. Poole ve diğ., 1988.
81. Poole ve diğ., 1988.
82. Garstang ve diğ., 1995.
83. Ketten, 1997.
84. Miles, Robert ve Hoy, 1995.
85. Sidebotham, 1877.
86. Noirot, 1966; Zippelius, 1974; Sales, 2010.
87. Sewell, 1970.
88. Panksepp ve Burgdorf, 2000.
89. Wilson ve Hare, 2004.
90. Holy ve Guo, 2005.
91. Neunuebel ve diğ., 2015.
92. Ultrasonik iletişim için *bkz.* Arch ve Narins, 2008.
93. Heffner, 1983; Heffner ve Heffner, 1985, 2018; Kojima, 1990; Ridgway ve Au, 2009; Reynolds ve diğ., 2010.
94. Heffner ve Heffner, 2018.
95. Heffner ve Heffner, 2018.
96. Arch ve Narins, 2008.
97. Aflitto ve DeGomez, 2014.
98. Ramsier ve diğ., 2012.
99. Pytte, Sicken ve Moise, 2004.
100. Olson ve diğ., 2018.
101. Goutte ve diğ., 2017.
102. Böceklerle yarasalar arasındaki mücadele için *bkz.* Conner ve Corcoran, 2012.
103. Moir, Jackson ve Windmill, 2013.
104. Nakano ve diğ., 2009, 2010.
105. Kawahara ve diğ., 2019.
106. Kawahara ve diğ., 2019.

9. BÖLÜM

1. Ekolokasyon üzerine ayrıntılı bir derleme için *bkz.* Surlykke ve diğ., 2014.
2. Boonman ve diğ., 2013.
3. Kalka, Smith ve Kalko, 2008.
4. Ekolokasyon araştırmalarının tarihi için *bkz.* Griffin, 1974; Grinnell, Gould ve Fenton, 2016.
5. Donald Griffin'in ekolokasyon üzerine klasik çalışması ve araştırmaları için *bkz.* Griffin, 1974.
6. Griffin, 1974.
7. Griffin, 1974, s. 67.
8. Griffin ve Galambos, 1941; Galambos ve Griffin, 1942.
9. Griffin, 1944a.
10. Griffin, 1953.
11. Griffin, Webster ve Michael, 1960.
12. Griffin, 2001.
13. Jones ve Teeling, 2006.

14. Schnitzler ve Kalko, 2001; Fenton ve diğ., 2016; Moss, 2018.
15. Surlykke ve Kalko, 2008.
16. Holderied ve von Helversen, 2003.
17. Jakobsen, Ratcliffe ve Surlykke, 2013.
18. Ghose, Moss ve Horiuchi, 2007.
19. Hulgard ve diğ., 2016.
20. Brinkløv, Kalko ve Surlykke, 2009.
21. Henson, 1965; Suga ve Schlegel, 1972.
22. Kick ve Simmons, 1984.
23. Elemans ve diğ., 2011; Ratcliffe ve diğ., 2013.
24. Simmons, Ferragamo ve Moss, 1998.
25. Simmons ve Stein, 1980; Moss ve Schnitzler, 1995.
26. Zagaeski ve Moss, 1994.
27. Moss ve Surlykke, 2010; Moss, Chiu ve Surlykke, 2011.
28. Grinnell ve Griffin, 1958.
29. Surlykke, Simmons ve Moss, 2016.
30. Chiu, Xian ve Moss, 2009.
31. Moss ve diğ., 2006; Kothari ve diğ., 2014.
32. Jung, Kalko ve von Helversen, 2007.
33. Geipel, Jung ve Kalko, 2013; Geipel ve diğ., 2019.
34. Chiu ve Moss, 2008; Chiu, Xian ve Moss, 2008.
35. Yovel ve diğ., 2009.
36. Suthers, 1967.
37. Ulanovsky ve Moss, 2008; Corcoran ve Moss, 2017.
38. Griffin, 1974.
39. Griffin, 1974, s. 160.
40. Zagaeski ve Moss, 1994.
41. Schnitzler ve Denzinger, 2011; Fenton, Faure ve Ratcliffe, 2012.
42. Kober ve Schnitzler, 1990; von der Emde ve Schnitzler, 1990; Koselj, Schnitzler ve Siemers, 2011.
43. Schuller ve Pollak, 1979; Schnitzler ve Denzinger, 2011.
44. Grinnell, 1966; Schuller ve Pollak, 1979.
45. Schnitzler, 1967.
46. Schnitzler, 1973.
47. Hiryu ve diğ., 2005.
48. Ntelezos, Guarato ve Windmill, 2016; Neil ve diğ., 2020.
49. Conner ve Corcoran, 2012.
50. Surlykke ve Kalko, 2008.
51. Dunning ve Roeder, 1965.
52. Dunning ve Roeder, 1965.
53. Barber ve Conner, 2007.
54. Corcoran, Barber ve Conner, 2009.
55. Corcoran ve diğ., 2011.
56. Barber ve Kawahara, 2013.
57. Goerlitz ve diğ., 2010; ter Hofstede ve Ratcliffe, 2016.
58. Barber ve diğ., 2015.
59. Rubin ve diğ., 2018.
60. Griffin, 2001.
61. Balinalarla yarasalardaki ekolokasyona dair bir karşılaştırma için *bkz.* Au ve Simmons, 2007; Surlykke ve diğ., 2014.
62. Schevill ve McBride, 1956.
63. Norris ve diğ., 1961.
64. Yunus ekolokasyonuyla ilgili araştırmalar için *bkz.* Au, 2011; Nachtigall, 2016.
65. Whitlow Au'nun yunus sonarıyla ilgili ufuk açıcı çalışmaları için *bkz.* Au, 1993.
66. Au, 1993.
67. Au ve Turl, 1983.
68. Brill ve diğ., 1992.
69. Pack ve Herman, 1995; Harley, Rotblat ve Nachtigall, 1996.

70. Cranford, Amending ve Norris, 1996.
71. Madsen ve diğ., 2002.
72. Møhl ve diğ., 2003.
73. Mooney, Yamato ve Branstetter, 2012.
74. Finneran, 2013.
75. Nachtigall ve Supin, 2008.
76. Au, 1993.
77. Ivanov, 2004; Finneran, 2013.
78. Madsen ve Surlykke, 2014.
79. Au, 1996.
80. Au ve diğ., 2009.
81. Popper ve diğ., 2004.
82. Gol'din, 2014.
83. Tyack, 1997; Tyack ve Clark, 2000.
84. Johnson, Aguilar de Soto ve Madsen, 2009.
85. Johnson ve diğ., 2004; Arranz ve diğ., 2011; Madsen ve diğ., 2013.
86. Benoit-Bird ve Au, 2009a, 2009b.
87. Thaler ve diğ., 2017.
88. Kish, 2015.
89. Gould, 1965; Eisenberg ve Gould, 1966; Siemers ve diğ., 2009.
90. Boonman, Bumrungsri ve Yovel, 2014.
91. Brinkløv ve Warrant, 2017; Brinkløv, Elemans ve Ratcliffe, 2017.
92. Brinkløv, Fenton ve Ratcliffe, 2013.
93. Thaler ve Goodale, 2016.
94. Schusterman ve diğ., 2000.
95. Diderot, 1749; Supa, Cotzin ve Dallenbach, 1944; Kish, 1995.
96. Supa, Cotzin ve Dallenbach, 1944.
97. Griffin, 1944a.
98. Thaler, Arnott ve Goodale, 2011.
99. Norman ve Thaler, 2019.
100. Thaler ve diğ., 2020.

10. BÖLÜM

1. Elektrikli balıklarla ilgili temel bilgiler için *bkz.* Hopkins, 2009; Carlson ve diğ., 2019.
2. Elektrikli balıkların tarihçesi için *bkz.* Wu, 1984; Zupanc ve Bullock, 2005; Carlson ve Sisneros, 2019.
3. Finger ve Piccolino, 2011.
4. Catania, 2019.
5. Catania, 2016.
6. de Santana ve diğ., 2019.
7. Hopkins, 2009.
8. Darwin, 1958, s. 178.
9. Lissmann'ın olaylı yaşamının detayları için *bkz.* Alexander, 1996.
10. Turkel, 2013.
11. Lissmann, 1951.
12. Lissmann, 1958.
13. Lissmann ve Machin, 1958.
14. Aktif elektrolokasyonla ilgili iki iyi derleme için *bkz.* Lewis, 2014; Caputi, 2017.
15. von der Emde, 1990, 1999; von der Emde ve diğ., 1998; Snyder ve diğ., 2007.
16. Hopkins, 2009.
17. Snyder ve diğ., 2007.
18. Salazar, Krahe ve Lewis, 2013.
19. von der Emde ve Ruhl, 2016.
20. Caputi ve diğ., 2013.
21. Caputi, Aguilera ve Pereira, 2011.
22. Caputi ve diğ., 2013.
23. Baker, 2019.
24. Modrell ve diğ., 2011; Baker, Modrell ve Gillis, 2013.
25. Lewis, 2014.
26. von der Emde, 1990.
27. Carlson ve Sisneros, 2019.
28. Saha araştırmalarının zorluklarından bazıları için *bkz.* Hagedorn, 2004.

29. Henninger ve diğ., 2018; Madhav ve diğ., 2018.
30. Elektrokomünikasyonla ilgili daha fazla bilg, için *bkz*. Zupanc ve Bullock (2005); Baker ve Carlson, 2019.
31. Hopkins, 1981; McGregor ve Westby, 1992; Carlson, 2002.
32. Hopkins ve Bass, 1981.
33. Bullock, Behrend ve Heiligenberg, 1975.
34. Hughes, 2001.
35. Bullock, 1969.
36. Hagedorn ve Heiligenberg, 1985.
37. Bullock, Behrend ve Heiligenberg, 1975.
38. Carlson ve Arnegard, 2011; Vélez, Ryoo ve Carlson, 2018.
39. Baker, Huck ve Carlson, 2015.
40. Nilsson, 1996; Sukhum ve diğ., 2016.
41. Arnegard ve Carlson, 2005.
42. Amey-Özel ve diğ., 2015.
43. Murray, 1960.
44. Dijkgraaf ve Kalmijn, 1962.
45. Josberger ve diğ., 2016.
46. Kalmijn, 1974.
47. Kalmijn, 1974; Bedore ve Kajiura, 2013.
48. Kalmijn, 1971.
49. Kalmijn, 1982.
50. Kajiura, 2003.
51. Pasif elektroresepsiyon için *bkz*. Hopkins, 2005, 2009.
52. Tricas, Michael ve Sisneros, 1995.
53. Kempster, Hart ve Collin, 2013.
54. Kajiura ve Holland, 2002.
55. Gardiner ve diğ., 2014.
56. Dijkgraaf ve Kalmijn, 1962.
57. Bedore, Kajiura ve Johnsen, 2015.
58. Kajiura, 2001.
59. Wueringer, Squire ve diğ., 2012a.
60. Wueringer, Squire ve diğ., 2012b.
61. Wueringer, 2012.
62. Elektroresepsiyon için *bkz*. Collin, 2019; Crampton, 2019.
63. Albert ve Crampton, 2006.
64. Czech-Damal ve diğ., 2012.
65. Gregory ve diğ., 1989.
66. Pettigrew, Manger ve Fine, 1998; Proske ve Gregory, 2003.
67. Baker, Modrell ve Gillis, 2013.
68. Lavoué ve diğ., 2012.
69. Lavoué ve diğ., 2012.
70. Czech-Damal ve diğ., 2013.
71. Feynman, 1964.
72. Corbet, Beaumont ve Eisikowitch, 1982; Vaknin ve diğ., 2000.
73. Clarke ve diğ., 2013.
74. Clarke ve diğ., 2013.
75. Sutton ve diğ., 2016.
76. Havada elektroresepsiyon için *bkz*. Clarke, Morley ve Robert, 2017.
77. Morley ve Robert, 2018.
78. Blackwall, 1830.
79. Fikri Gorham yeniden canlandırdı, 2013.

11. BÖLÜM

1. Warrant ve diğ., 2016.
2. Dreyer ve diğ., 2018.
3. Manyetik algılama için *bkz*. Johnsen ve Lohmann, 2005; Mouritsen, 2018.
4. Merkel ve Fromme, 1958; Pollack, 2012.
5. Middendor, 1855.
6. Griffin, 1944b.
7. Wiltschko ve Merkel, 1965; Wiltschko, 1968.
8. Brown, 1962; Brown, Webb ve Barnwell, 1964.
9. Johnsen ve Lohmann, 2005.

10. Wiltschko ve Wiltschko, 2019.
11. Lohmann ve diğ., 1995; Deutschlander, Borland ve Phillips, 1999; Sumner-Rooney ve diğ., 2014; Scanlan ve diğ., 2018.
12. Holland ve diğ., 2006.
13. Bottesch ve diğ., 2016.
14. Kimchi, Etienne ve Terkel, 2004.
15. Dreyer ve diğ., 2018.
16. Granger ve diğ., 2020.
17. Bianco, Ilieva ve Åkesson, 2019.
18. Deniz kaplumbağası göçleri için *bkz.* Lohmann ve Lohmann (2019).
19. Carr, 1995.
20. Lohmann, 1991.
21. Lohmann ve Lohmann, 1994, 1996.
22. Lohmann, Putman ve Lohmann, 2008.
23. Lohmann ve diğ., 2001.
24. Lohmann ve diğ., 2004.
25. Boles ve Lohmann, 2003.
26. Fransson ve diğ., 2001.
27. Chernetsov, Kishinev ve Mouritsen, 2008.
28. Putman ve diğ., 2013; Wynn ve diğ., 2020.
29. Lohmann, Putman ve Lohmann, 2008.
30. Mortimer ve Portier, 1989.
31. Brothers ve Lohmann, 2018.
32. Johnsen, 2017.
33. Nordmann, Hochstoeger ve Keays, 2017.
34. Wiltschko ve Wiltschko, 2013; Shaw ve diğ., 2015.
35. Blakemore, 1975.
36. Fleissner ve diğ., 2003, 2007.
37. Treiber ve diğ., 2012.
38. Eder ve diğ., 2012.
39. Edelman ve diğ, 2015.
40. Paulin, 1995.
41. Viguier, 1882.
42. Nimpf ve diğ., 2019.
43. Wu ve Dickman, 2012.
44. Radikal çift hipotezi için *bkz.* Hore and Mouritsen, 2016.
45. Schulten, kişisel iletişim, 2010.
46. Schulten, Swenberg ve Weller, 1978.
47. Ritz, Adem ve Schulten, 2000.
48. Mouritsen ve diğ., 2005.
49. Heyers ve diğ., 2007; Zapka ve diğ., 2009.
50. Einwich ve diğ., 2020; Hochstoeger ve diğ., 2020.
51. Engels ve diğ., 2014.
52. Kirschvink ve diğ., 1997.
53. Baltzley ve Nabity, 2018.
54. Etheredge ve diğ., 1999.
55. Wiltschko ve diğ., 2002.
56. Hein ve diğ., 2011; Engels ve diğ., 2012.
57. Vidal-Gadea ve diğ., 2015; Qin ve diğ., 2016.
58. Meister, 2016; Winklhofer ve Mouritsen, 2016; Friis, Sjulstok ve Solov'yov, 2017; Landler ve diğ., 2018.
59. Baker, 1980.
60. Wang ve diğ., 2019.
61. Tekrarlanabilir olmayan bilimle ilgili meseleler için *bkz.* Aschwanden, 2015.
62. Johnsen, Lohmann ve Warrant, 2020.
63. Manyetik algılama ve hayvanlarda diğer navigasyon yöntemleri için *bkz.* Mouritsen, 2018.

12. BÖLÜM

1. Sivrisineklerin konaklarını bulmak için kullandığı duyusal ipuçları için *bkz.* Wolff ve Riffell, 2018.
2. DeGennaro ve diğ., 2013.
3. McMeniman ve diğ., 2014.
4. Liu ve Vosshall, 2019.
5. Dennis, Goldman ve Vosshall, 2019.
6. McBride ve diğ., 2014; McBride, 2016.
7. Shamble ve diğ., 2016.
8. Catania, 2006.
9. Barbero ve diğ., 2009.
10. Gardiner ve diğ., 2014.
11. von der Emde ve Ruhl, 2016.
12. Dreyer ve diğ., 2018; Mouritsen, 2018.
13. Ward, 2013.
14. Pettigrew, Manger ve Fine, 1998.
15. Wheeler, 1910, s. 510.
16. Schumacher ve diğ., 2016.
17. Solvi, Gutierrez Al-Khudhairy ve Chittka, 2020.
18. Propriyosepsiyon için *bkz.* Tuthill ve Azim, 2018.
19. Cole, 2016.
20. Eksaferenz, reaferenz ve koroller deşarj kavramları için *bkz.* Cullen, 2004; Crapse ve Sommer, 2008.
21. Merker, 2005.
22. Ludeman ve diğ., 2014.
23. Bu görüşün tam tarihçesi için *bkz.* Grüsser, 1994.
24. von Holst ve Mittelstaedt, 1950; Sperry, 1950.
25. Grüsser, 1994.
26. Elektrikli balıklardaki koroller deşarjlar için *bkz.* Sawtell, 2017; Fukutomi ve Carlson, 2020.
27. Poulet ve Hedwig, 2003.
28. Pynn ve DeSouza, 2013.
29. Ahtapotun nörobiyolojisi için *bkz.* Grasso, 2014; Levy ve Hochner, 2017.
30. Crook ve Walters, 2014.
31. Graziadei ve Gagne, 1976.
32. Nesher ve diğ., 2014.
33. Grasso, 2014.
34. Sumbre ve diğ., 2006.
35. Gutnick ve diğ., 2011.
36. Zullo ve diğ., 2009; Hochner, 2013.
37. Godfrey-Smith, 2016, s. 48.
38. Godfrey-Smith, 2016, s. 105.
39. Grasso, 2014.

13. BÖLÜM

1. Altıncı yok oluş için *bkz.* Kolbert, 2014; Ceballos, Ehrlich ve Dirzo, 2017.
2. Duyusal kirlilik için *bkz.* Swaddle ve diğ., 2015; Dominoni ve diğ., 2020.
3. Spoelstra ve diğ., 2017.
4. D'Estries, 2019.
5. Cinzano, Falchi ve Elvidge, 2001.
6. Falchi ve diğ., 2016.
7. Kyba ve diğ., 2017.
8. Johnsen, 2012, s. 57.
9. Van Doren ve diğ., 2017.
10. Longcore ve Rich, 2016.
11. Longcore ve diğ., 2012.
12. Gehring, Berlinger ve Manville, 2009.
13. Işık kirliliği ve yaban hayatı üzerindeki etkileri için *bkz.* Sanders ve diğ., 2021.
14. Gaston, 2019.
15. Witherington ve Martin, 2003.
16. Owens ve diğ., 2020.

17. Degen ve diğ., 2016.
18. Knop ve diğ., 2017.
19. Horváth ve diğ., 2009.
20. Inger ve diğ., 2014.
21. Falchi ve diğ., 2016; Longcore, 2018.
22. Buxton ve diğ., 2017.
23. Gürültü kirliliği ve etkileri için *bkz.* Barber, Crooks ve Fristrup, 2010; Shannon ve diğ., 2016.
24. Swaddle ve diğ., 2015.
25. Slabbekoorn ve Peet, 2003.
26. Brumm, 2004.
27. Leonard ve Horn, 2008; Gross, Pasinelli ve Kunc, 2010; Montague, Danek-Gontard ve Kunc 2013; Gil ve diğ, 2015.
28. Francis ve diğ., 2017.
29. Ware ve diğ., 2015.
30. Barton ve diğ., 2018.
31. Shannon ve diğ., 2014.
32. Senzaki ve diğ., 2016.
33. Phillips ve diğ., 2019.
34. Blickley ve diğ., 2012.
35. Suraci ve diğ., 2019.
36. Riitters ve Wickham, 2003.
37. Okyanustaki doğal ve insan kaynaklı gürültüler için *bkz.* Duarte ve diğ., 2021.
38. Horwitz, 2015.
39. DeRuiter ve diğ., 2013; Miller, Kvadsheim ve diğ., 2015.
40. Frisk, 2012.
41. Payne ve Webb, 1971.
42. Rolland ve diğ., 2012; Erbe, Dunlop ve Dolman, 2018; Tsujii ve diğ., 2018; Erbe ve diğ., 2019.
43. Kunc ve diğ., 2014; Simpson ve diğ., 2016; Murchy ve diğ., 2019.
44. Deniz nakliyatına bağlı gürültü için *bkz.* Hildebrand, 2005; Malako, 2010.
45. Greif ve diğ., 2017.
46. Wilcox, Van Sebille ve Hardesty, 2015; Savoca ve diğ., 2016.
47. Rycyk ve diğ., 2018.
48. Tierney ve diğ., 2008.
49. Gill ve diğ., 2014.
50. Altermatt ve Ebert, 2016.
51. Czaczkes ve diğ., 2018.
52. Halfwerk ve diğ., 2019.
53. Seehausen ve diğ., 2008.
54. Seehausen, van Alphen ve Witte, 1997.
55. Witte ve diğ., 2013.
56. Kapoor, 2020.
57. Francis ve diğ., 2012.
58. Gordon ve diğ., 2018, 2019.
59. Irwin, Horner ve Lohmann, 2004.
60. Jechow ve Hölker, 2020.
61. Lecocq ve diğ., 2020.
62. Calma, 2020; Smith ve diğ., 2020.
63. Derryberry ve diğ., 2020.
64. Stack ve diğ., 2011.
65. Duyusal kirliliği azaltmanın yolları için *bkz.* Longcore ve Rich, 2016; Duarte ve diğ., 2021.
66. Cronon, 1996.
67. Uexküll, 2010, s. 133.

Kaynakça

Ache, B. W. ve Young, J. M. (2005) Olfaction: Diverse species, conserved principles, *Neuron,* 48(3), 417–430.

Ackerman, D. (1991) *A natural history of the senses.* New York: Vintage Books.

Adamo, S. A. (2016) Do insects feel pain? A question at the intersection of animal behaviour, philosophy and robotics, *Animal Behaviour,* 118, 75–79.

Adamo, S. A. (2019) Is it pain if it does not hurt? On the unlikelihood of insect pain, *The Canadian Entomologist,* 151(6), 685–695.

Aflitto, N. ve DeGomez, T. (2014) Sonic pest repellents, College of Agriculture, University of Arizona (Tucson, AZ). Erişim adresi: repository.arizona.edu/handle/10150/333139.

Agnarsson, I., Kuntner, M. Ve Blackledge, T. A. (2010) Bioprospecting finds the toughest biological material: Extraordinary silk from a giant riverine orb spider, *PLOS One,* 5(9), e11234.

Albert, J. S. ve Crampton, W. G. R. (2006) Electroreception and electrogenesis, *The physiology of fishes* içinde, Evans, D. H., and Claiborne, J. B. (haz.), 3. basım., s. 431–472. Boca Raton, FL: CRC Press.

Alexander, R. M. (1996) Hans Werner Lissmann, 30 Nisan 1909–21 Nisan 1995, *Biographical Memoirs of Fellows of the Royal Society,* 42, 235–245.

Altermatt, F. ve Ebert, D. (2016) Reduced flight-to-light behaviour of moth populations exposed to long-term urban light pollution, *Biology Letters,* 12(4), 20160111.

Alupay, J. S., Hadjisolomou, S. P. ve Crook, R. J. (2014) Arm injury produces long-term behavioral and neural hypersensitivity in octopus, *Neuroscience Letters,* 558, 137–142.

Amey-Özel, M. ve diğ. (2015) More a finger than a nose: The trigeminal motor and sensory innervation of the Schnauzenorgan in the elephant-nose fish Gnathonemus petersii, *Journal of Comparative Neurology,* 523(5), 769–789.

Anand, K. J. S., Sippell, W. G. ve Aynsley-Green, A. (1987) Randomised trial of fentanyl anaesthesia in preterm babies undergoing surgery: Effects on the stress response, *The Lancet,* 329(8527), 243–248.

Andersson, S., Ornborg, J. ve Andersson, M. (1998) Ultraviolet sexual dimorphism and assortative mating in blue tits, *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences,* 265(1395), 445–450.

Andrews, M. T. (2019) Molecular interactions underpinning the phenotype of hibernation in mammals, *Journal of Experimental Biology,* 222(Pt 2), jeb160606.

Appel, M. ve Elwood, R. W. (2009) Motivational trade-offs and potential pain experience in hermit crabs, *Applied Animal Behaviour Science,* 119(1), 120–124.

Arch, V. S. ve Narins, P. M. (2008) "Silent" signals: Selective forces acting on ultrasonic communication systems in terrestrial vertebrates, *Animal Behaviour,* 76(4), 1423–1428.

Arikawa, K. (2001) Hindsight of butterflies: The *Papilio* butterfly has light sensitivity in the genitalia, which appears to be crucial for reproductive behavior, *BioScience,* 51(3), 219–225.

Arikawa, K. (2017) The eyes and vision of butterflies, *Journal of Physiology,* 595(16), 5457–5464.

Arkley, K. ve diğ. (2014) Strategy change in vibrissal active sensing during rat locomotion, *Current Biology,* 24(13), 1507–1512.

Arnegard, M. E. ve Carlson, B. A. (2005) Electric organ discharge patterns during group hunting by a mormyrid fish, *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences,* 272(1570), 1305–1314.

Arranz, P. ve diğ. (2011) Following a foraging fish-finder: Diel habitat use of Blainville's beaked whales revealed by echolocation, *PLOS One,* 6(12), e28353.

Aschwanden, C. (2015) Science isn't broken, *FiveThirtyEight.* Erişim adresi: fivethirtyeight.com/features/science-isnt-broken/.

Atema, J. (1971) Structures and functions of the sense of taste in the catfish (*Ictalurus natalis*), *Brain, Behavior and Evolution,* 4(4), 273–294.

Atema, J. (2018) Opening the chemosensory world of the lobster, *Homarus americanus*, *Bulletin of Marine Science,* 94(3), 479–516.

Au, W. W. L. (1993) *The sonar of dolphins.* New York: Springer-Verlag.

Au, W. W. L. (1996) Acoustic reflectivity of a dolphin, *Journal of the Acoustical Society of America,* 99(6), 3844–3848.

Au, W. W. L. (2011) History of dolphin biosonar research, *Acoustics Today,* 11(4), 10–17.

Au, W. W. L. ve diğ. (2009) Acoustic basis for fish prey discrimination by echolocating dolphins and porpoises, *Journal of the Acoustical Society of America,* 126(1), 460–467.

Au, W. W. L. ve Simmons, J. A. (2007) Echolocation in dolphins and bats, *Physics Today,* 60(9), 40–45.

Au, W. W. ve Turl, C. W. (1983) Target detection in reverberation by an echolocating Atlantic bottlenose dolphin (*Tursiops truncatus*), *Journal of the Acoustical Society of America,* 73(5), 1676–1681.

Audubon, J. J. (1826) Account of the habits of the turkey buzzard (*Vultur aura*), particularly with the view of exploding the opinion generally entertained of its extraordinary power of smelling, *Edinburgh New Philosophical Journal,* 2, 172–184.

Avrupa Parlamentosu, Avrupa Birliği Konseyi (2010), Bilimsel amaçlarla kullanılan hayvanların korunmasına ilişkin 22 Eylül 2010 tarihli ve 2010/63/EU sayılı Avrupa Parlamentosu ve Konsey Direktifi: AEA ile ilgili metin, L 276(20.10.2010), 33-79.

Baden, T., Euler, T. ve Berens, P. (2020) Understanding the retinal basis of vision across species, *Nature Reviews Neuroscience,* 21(1), 5–20.

Baker, C. A. ve Carlson, B. A. (2019) Electric signals, *Encyclopedia of animal behavior* içinde, Choe, J. C. (haz.), 2. basım, s. 474–486. Amsterdam: Elsevier.

Baker, C. A., Huck, K. R. ve Carlson, B. A. (2015) Peripheral sensory coding through oscillatory synchrony in weakly electric fish, *eLife,* 4, e08163.

Baker, C. V. H. (2019) The development and evolution of lateral line electroreceptors: Insights from comparative molecular approaches, *Electroreception: Fundamental insights from comparative approaches* içinde, Carlson, B. A. ve diğ. (haz.), 25–62. Cham: Springer.

Baker, C. V. H., Modrell, M. S. ve Gillis, J. A. (2013) The evolution and development of vertebrate lateral line electroreceptors, *Journal of Experimental Biology,* 216(13), 2515–2522.

Baker, R. R. (1980) Goal orientation by blindfolded humans after long-distance displacement: Possible involvement of a magnetic sense, *Science,* 210(4469), 555–557.

Bakken, G. S. ve diğ. (2018) Cooler snakes respond more strongly to infrared stimuli, but we have no idea why, *Journal of Experimental Biology,* 221(17), jeb182121.

Bakken, G. S. ve Krochmal, A. R. (2007) The imaging properties and sensitivity of the facial pits of pitvipers as determined by optical and heat-transfer analysis, *Journal of Experimental Biology,* 210(16), 2801–2810.

Baldwin, M. W. ve diğ. (2014) Evolution of sweet taste perception in hummingbirds by transformation of the ancestral umami receptor, *Science,* 345(6199), 929–933.

Bálint, A. ve diğ. (2020) Dogs can sense weak thermal radiation, *Scientific Reports,* 10(1), 3736.

Baltzley, M. J. ve Nabity, M. W. (2018) Reanalysis of an oft-cited paper on honeybee magnetoreception reveals random behavior, *Journal of Experimental Biology,* 221(Pt 22), jeb185454.

Bang, B. G. (1960) Anatomical evidence for olfactory function in some species of birds, *Nature,* 188(4750), 547–549.

Bang, B. G. ve Cobb, S. (1968) The size of the olfactory bulb in 108 species of birds, *The Auk,* 85(1), 55–61.

Barber, J. R. ve diğ. (2015) Moth tails divert bat attack: Evolution of acoustic deflection, *Proceedings of the National Academy of Sciences,* 112(9), 2812–2816.

Barber, J. R. ve Conner, W. E. (2007) Acoustic mimicry in a predator-prey interaction, *Proceedings of the National Academy of Sciences,* 104(22), 9331–9334.

Barber, J. R., Crooks, K. R. ve Fristrup, K. M. (2010) The costs of chronic noise exposure for terrestrial organisms, *Trends in Ecology & Evolution,* 25(3), 180–189.

Barber, J. R. ve Kawahara, A. Y. (2013) Hawkmoths produce anti-bat ultrasound, *Biology Letters,* 9(4), 20130161.

Barbero, F. ve diğ. (2009) Queen ants make distinctive sounds that are mimicked by a butterfly social parasite, *Science,* 323(5915), 782–785.

Bargmann, C. I. (2006) Comparative chemosensation from receptors to ecology, *Nature,* 444(7117), 295–301.

Barth, F. G. (2002) *A spider's world: Senses and behavior.* Berlin: Springer.

Barth, F. (2015) A spider's tactile hairs, *Scholarpedia,* 10(3), 7267.

Barth, F. G. ve Höller, A. (1999) Dynamics of arthropod filiform hairs. V. The response of spider trichobothria to natural stimuli, *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences,* 354(1380), 183–192.

Barton, B. T. ve diğ. (2018) Testing the AC/DC hypothesis: Rock and roll is noise pollution and weakens a trophic cascade, *Ecology and Evolution,* 8(15), 7649–7656.

Basolo, A. L. (1990) Female preference predates the evolution of the sword in swordtail fish, *Science,* 250(4982), 808–810.

Bates, A. E. ve diğ. (2010) Deep-sea hydrothermal vent animals seek cool fluids in a highly variable thermal environment, *Nature Communications,* 1(1), 14.

Bates, L. A. ve diğ. (2007) Elephants classify human ethnic groups by odor and garment color, *Current Biology,* 17(22), 1938–1942.

Bates, L. A. ve diğ. (2008) African elephants have expectations about the locations of out-of-sight family members, *Biology Letters,* 4(1), 34–36.

Bateson, P. (1991) Assessment of pain in animals, *Animal Behaviour,* 42(5), 827–839.

Bauer, G. B. ve diğ. (2012) Tactile discrimination of textures by Florida manatees (*Trichechus manatus latirostris*), *Marine Mammal Science,* 28(4), E456–E471.

Bauer, G. B., Reep, R. L. ve Marshall, C. D. (2018) The tactile senses of marine mammals, *International Journal of Comparative Psychology,* 31.

Baxi, K. N., Dorries, K. M. ve Eisthen, H. L. (2006) Is the vomeronasal system really specialized for detecting pheromones?, *Trends in Neurosciences,* 29(1), 1–7.

Bedore, C. N. ve Kajiura, S. M. (2013) Bioelectric fields of marine organisms: Voltage and frequency contributions to detectability by electroreceptive predators, *Physiological and Biochemical Zoology,* 86(3), 298–311.

Bedore, C. N., Kajiura, S. M. ve Johnsen, S. (2015) Freezing behaviour facilitates bioelectric crypsis in cuttlefish faced with predation risk, *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences,* 282(1820), 20151886.

Benoit-Bird, K. J. ve Au, W. W. L. (2009a) Cooperative prey herding by the pelagic dolphin, *Stenella longirostris, Journal of the Acoustical Society of America,* 125(1), 125–137.

Benoit-Bird, K. J. ve Au, W. W. L. (2009b) Phonation behavior of cooperatively foraging spinner dolphins, *Journal of the Acoustical Society of America,* 125(1), 539–546.

Bernal, X. E., Rand, A. S. ve Ryan, M. J. (2006) Acoustic preferences and localization performance of blood-sucking flies (*Corethrella Coquillett*) to túngara frog calls, *Behavioral Ecology,* 17(5), 709–715.

Beston, H. (2003) *The outermost house: A year of life on the great beach of Cape Cod.* New York: Holt Paperbacks.

Bianco, G., Ilieva, M. ve Åkesson, S. (2019) Magnetic storms disrupt nocturnal migratory activity in songbirds, *Biology Letters,* 15(3), 20180918.

Bingman, V. P. ve diğ. (2017) Importance of the antenniform legs, but not vision, for homing by the neotropical whip spider *Paraphrynus laevifrons, Journal of Experimental Biology,* 220(Pt 5), 885–890.

Birkhead, T. (2013) *Bird sense: What it's like to be a bird.* New York: Bloomsbury.

Bisoffi, Z. ve diğ. (2013) *Strongyloides stercoralis:* A plea for action, *PLOS Neglected Tropical Diseases,* 7(5), e2214.

Bjørge, M. H. ve diğ. (2011) Behavioural changes following intraperitoneal vaccination in Atlantic salmon (*Salmo salar*), *Applied Animal Behaviour Science,* 133(1), 127–135.

Blackledge, T. A., Kuntner, M. ve Agnarsson, I. (2011) The form and function of spider orb webs, *Advances in insect physiology* içinde, Casas, J. (haz), s. 175–262. Amsterdam: Elsevier.

Blackwall, J. (1830) Mr Murray's paper on the aerial spider, *Magazine of Natural History and Journal of Zoology, Botany, Mineralogy, Geology, and Meteorology,* 2, 116–413.

Blakemore, R. (1975) Magnetotactic bacteria, *Science,* 190(4212), 377–379.

Bleicher, S. S. ve diğ. (2018) Divergent behavior amid convergent evolution: A case of four desert rodents learning to respond to known and novel vipers, *PLOS One,* 13(8), e0200672.

Blickley, J. L. ve diğ. (2012) Experimental chronic noise is related to elevated fecal corticosteroid metabolites in lekking male greater sage-grouse (*Centrocercus urophasianus*), *PLOS One,* 7(11), e50462.

Bok, M. J. ve diğ. (2014) Biological sunscreens tune polychromatic ultraviolet vision in mantis shrimp, *Current Biology,* 24(14), 1636–1642.

Bok, M. J., Capa, M. ve Nilsson, D.-E. (2016) Here, there and everywhere: The radiolar eyes of fan worms (Annelida, Sabellidae), *Integrative and Comparative Biology,* 56(5), 784–795.

Boles, L. C. ve Lohmann, K. J. (2003) True navigation and magnetic maps in spiny lobsters, *Nature,* 421(6918), 60–63.

Bonadonna, F. ve diğ. (2006) Evidence that blue petrel, *Halobaena caerulea,* fledglings can detect and orient to dimethyl sulfide, *Journal of Experimental Biology,* 209(11), 2165–2169.

Boonman, A. ve diğ. (2013) It's not black or white: On the range of vision and echolocation in echolocating bats, *Frontiers in Physiology,* 4, 248.

Boonman, A., Bumrungsri, S. ve Yovel, Y. (2014) Nonecholocating fruit bats produce biosonar clicks with their wings, *Current Biology,* 24(24), 2962–2967.

Boström, J. E. ve diğ. (2016) Ultra-rapid vision in birds, *PLOS One,* 11(3), e0151099.

Bottesch, M. ve diğ. (2016) A magnetic compass that might help coral reef fish larvae return to their natal reef, *Current Biology,* 26(24), R1266–R1267.

Braithwaite, V. (2010) *Do fish feel pain?* New York: Oxford University Press.

Braithwaite, V. ve Droege, P. (2016) Why human pain can't tell us whether fish feel pain, *Animal Sentience,* 3(3).

Braude, S. ve diğ. (2021) Surprisingly long survival of premature conclusions about naked mole-rat biology, *Biological Reviews,* 96(2), 376–393.

Brill, R. L. ve diğ. (1992) Target detection, shape discrimination, and signal characteristics of an echolocating false killer whale (*Pseudorca crassidens*), *Journal of the Acoustical Society of America,* 92(3), 1324–1330.

Brinkløv, S., Elemans, C. P. H. ve Ratcliffe, J. M. (2017) Oilbirds produce echolocation signals beyond their best hearing range and adjust signal design to natural light conditions, *Royal Society Open Science,* 4(5), 170255.

Brinkløv, S., Fenton, M. B. ve Ratcliffe, J. M. (2013) Echolocation in oilbirds and swiftlets, *Frontiers in Physiology,* 4, 123.

Brinkløv, S., Kalko, E. K. V. ve Surlykke, A. (2009) Intense echolocation calls from two "whispering" bats, *Artibeus jamaicensis* and *Macrophyllum macrophyllum* (Phyllostomidae), *Journal of Experimental Biology,* 212(Pt 1), 11–20.

Brinkløv, S. ve Warrant, E. (2017) Oilbirds, *Current Biology,* 27(21), R1145–R1147.

Briscoe, A. D. ve diğ. (2010) Positive selection of a duplicated UV-sensitive visual pigment coincides with wing pigment evolution in *Heliconius* butterflies, *Proceedings of the National Academy of Sciences,* 107(8), 3628–3633.

Broom, D. (2001) Evolution of pain, *Vlaams Diergeneeskundig Tijdschrift,* 70, 17–21.

Brothers, J. R. ve Lohmann, K. J. (2018) Evidence that magnetic navigation and geomagnetic imprinting shape spatial genetic variation in sea turtles, *Current Biology,* 28(8), 1325–1329.e2.

Brown, F. A. (1962) Responses of the planarian, dugesia, and the protozoan, paramecium, to very weak horizontal magnetic fields, *Biological Bulletin,* 123(2), 264–281.

Brown, F. A., Webb, H. M. ve Barnwell, F. H. (1964) A compass directional phenomenon in mud-snails and its relation to magnetism, *Biological Bulletin,* 127(2), 206–220.

Brown, R. E. ve Fedde, M. R. (1993) Airflow sensors in the avian wing, *Journal of Experimental Biology,* 179(1), 13–30.

Brownell, P. ve Farley, R. D. (1979a) Detection of vibrations in sand by tarsal sense organs of the nocturnal scorpion, *Paruroctonus mesaensis, Journal of Comparative Physiology A,* 131(1), 23–30.

Brownell, P. ve Farley, R. D. (1979b) Orientation to vibrations in sand by the nocturnal scorpion, *Paruroctonus mesaensis:* Mechanism of target localization, *Journal of Comparative Physiology A,* 131(1), 31–38.

Brownell, P. ve Farley, R. D. (1979c) Prey-localizing behaviour of the nocturnal desert scorpion, *Paruroctonus mesaensis*: Orientation to substrate vibrations, *Animal Behaviour,* 27(Pt 1), 185–193.

Brownell, P. H. (1984) Prey detection by the sand scorpion, *Scientific American,* 251(6), 86–97.

Brumm, H. (2004) The impact of environmental noise on song amplitude in a territorial bird, *Journal of Animal Ecology,* 73(3), 434–440.

Brunetta, L. ve Craig, C. L. (2012) *Spider silk: Evolution and 400 million years of spinning, waiting, snagging, and mating.* New Haven, CT: Yale University Press.

Bryant, A. S. ve diğ. (2018) A critical role for thermosensation in host seeking by skin-penetrating nematodes, *Current Biology,* 28(14), 2338–2347.e6.

Bryant, A. S. ve Hallem, E. A. (2018) Temperature-dependent behaviors of parasitic helminths, *Neuroscience Letters,* 687, 290–303.

Bullock, T. H. (1969) Species differences in effect of electroreceptor input on electric organ pacemakers and other aspects of behavior in electric fish, *Brain, Behavior and Evolution,* 2(2), 102–118.

Bullock, T. H., Behrend, K. ve Heiligenberg, W. (1975) Comparison of the jamming avoidance responses in Gymnotoid and Gymnarchid electric fish: A case of convergent evolution of behavior and its sensory basis, *Journal of Comparative Physiology,* 103(1), 97–121.

Bullock, T. H. ve Diecke, F. P. J. (1956) Properties of an infra-red receptor, *Journal of Physiology,* 134(1), 47–87.

Bush, N. E., Solla, S. A. ve Hartmann, M. J. (2016) Whisking mechanics and active sensing, *Current Opinion in Neurobiology,* 40, 178–188.

Buxton, R. T. ve diğ. (2017) Noise pollution is pervasive in U.S. protected areas, *Science,* 356(6337), 531–533.

Cadena, V. ve diğ. (2013) Evaporative respiratory cooling augments pit organ thermal detection in rattlesnakes, *Journal of Comparative Physiology A,* 199(12), 1093–1104.

Caldwell, M. S., McDaniel, J. G. ve Warkentin, K. M. (2010) Is it safe? Red-eyed treefrog embryos assessing predation risk use two features of rain vibrations to avoid false alarms, *Animal Behaviour,* 79(2), 255–260.

Calma, J. (2020) The pandemic turned the volume down on ocean noise pollution, *The Verge.* Erişim adresi: www.theverge.com/22166314/covid-19-pandemic-ocean-noise-pollution.

Caprio, J. (1975) High sensitivity of catfish taste receptors to amino acids, *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Physiology,* 52(1), 247–251.

Caprio, J. ve diğ (1993) The taste system of the channel catfish: From biophysics to behavior, *Trends in Neurosciences,* 16(5), 192–197.

Caputi, A. A. (2017) Active electroreception in weakly electric fish, in Sherman, S. M. (ed), *Oxford research encyclopedia of neuroscience.* New York: Oxford Universit Press. Erişim adresi: DOI: 10.1093/acrefore/9780190264086.013.106. Caputi, A. A. ve diğ. (2013) On the haptic nature of the active electric sense of fish, *Brain Research,* 1536, 27–43.

Caputi, Á. A., Aguilera, P. A. ve Pereira, A. C. (2011) Active electric imaging: Body-object interplay and object's "electric texture," *PLOS One,* 6(8), e22793.

Caras, M. L. (2013) Estrogenic modulation of auditory processing: A vertebrate comparison, *Frontiers in Neuroendocrinology,* 34(4), 285–299.

Carlson, B. A. (2002) Electric signaling behavior and the mechanisms of electric organ discharge production in mormyrid fish, *Journal of Physiology-Paris,* 96(5), 405–419.

Carlson, B. A. ve diğ. (haz.), (2019) *Electroreception: Fundamental insights from comparative approaches.* Cham: Springer.

Carlson, B. A. ve Arnegard, M. E. (2011) Neural innovations and the diversification of African weakly electric fishes, *Communicative & Integrative Biology,* 4(6), 720–725.

Carlson, B. A. ve Sisneros, J. A. (2019) A brief history of electrogenesis and electroreception in fishes, *Electroreception: Fundamental insights from comparative approaches* içinde, Carlson, B. A. ve diğ. (haz.), s. 1–23. Cham: Springer.

Caro, T. M. (2016) *Zebra stripes.* Chicago: University of Chicago Press.

Caro, T. ve diğ. (2019) Benefits of zebra stripes: Behaviour of tabanid flies around zebras and horses, *PLOS One,* 14(2), e0210831.

Carpenter, C. W. ve diğ. (2018) Human ability to discriminate surface chemistry by touch, *Materials Horizons,* 5(1), 70–77.

Carr, A. (1995) Notes on the behavioral ecology of sea turtles, *Biology and conservation of sea turtles* içinde, Bjorndal, K. A. (haz.), gözden geçirilmiş basım, s. 19–26. Washington, DC: Smithsonian Institution Press.

Carr, A. L. ve Salgado, V. L. (2019) Ticks home in on body heat: A new understanding of Haller's organ and repellent action, *PLOS One,* 14(8), e0221659.

Carr, C. E. ve Christensen-Dalsgaard, J. (2015) Sound localization strategies in three predators, *Brain, Behavior and Evolution,* 86(1), 17–27.

Carr, C. E. ve Christensen-Dalsgaard, J. (2016) Evolutionary trends in directional hearing, *Current Opinion in Neurobiology,* 40, 111–117.

Carr, T. D. ve diğ. (2017) A new tyrannosaur with evidence for anagenesis and crocodile-like facial sensory system, *Scientific Reports,* 7(1), 44942.

Carrete, M. ve diğ. (2012) Mortality at wind-farms is positively related to large-scale distribution and aggregation in griffon vultures, *Biological Conservation,* 145(1), 102–108.

Carvalho, L. S. ve diğ. (2017) The genetic and evolutionary drives behind primate color vision, *Frontiers in Ecology and Evolution,* 5, 34.

Casas, J. ve Dangles, O. (2010) Physical ecology of fluid flow sensing in arthropods, *Annual Review of Entomology,* 55(1), 505–520.

Casas, J. ve Steinmann, T. (2014) Predator-induced flow disturbances alert prey, from the onset of an attack, *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences,* 281(1790), 20141083.

Catania, K. C. (1995a) Magnified cortex in star-nosed moles, *Nature,* 375(6531), 453–454.

Catania, K. C. (1995b) Structure and innervation of the sensory organs on the snout of the star-nosed mole, *Journal of Comparative Neurology,* 351(4), 536–548.

Catania, K. C. (2006) Olfaction: Underwater "sniffing" by semi-aquatic mammals, *Nature,* 444(7122), 1024–1025.

Catania, K. C. (2008) Worm grunting, fiddling, and charming—Humans unknowingly mimic a predator to harvest bait, *PLOS One,* 3(10), e3472.

Catania, K. C. (2011) The sense of touch in the star-nosed mole: From mechanoreceptors to the brain, *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences,* 366(1581), 3016– 3025.

Catania, K. C. (2016) Leaping eels electrify threats, supporting Humboldt's account of a battle with horses, *Proceedings of the National Academy of Sciences,* 113(25), 6979–6984.

Catania, K. C. (2019) The astonishing behavior of electric eels, *Frontiers in Integrative Neuroscience,* 13, 23.

Catania, K. C. ve diğ. (1993) Nose stars and brain stripes, *Nature,* 364(6437), 493.

Catania, K. C. ve Kaas, J. H. (1997a) Somatosensory fovea in the star-nosed mole: Behavioral use of the star in relation to innervation patterns and cortical representation, *Journal of Comparative Neurology,* 387(2), 215–233.

Catania, K. C. ve Kaas, J. H. (1997b) The mole nose instructs the brain, *Somatosensory & Motor Research,* 14(1), 56–58.

Catania, K. C., Northcutt, R. G. ve Kaas, J. H. (1999) The development of a biological novelty: A different way to make appendages as revealed in the snout of the star-nosed mole *Condylura cristata, Journal of Experimental Biology,* 202(Pt 20), 2719–2726.

Catania, K. C. ve Remple, F. E. (2004) Tactile foveation in the star-nosed mole, *Brain, Behavior and Evolution,* 63(1), 1–12.

Catania, K. C. ve Remple, F. E. (2005) Asymptotic prey profitability drives star-nosed moles to the foraging speed limit, *Nature,* 433(7025), 519–522.

Catania, K. C. ve Remple, M. S. (2002) Somatosensory cortex dominated by the representation of teeth in the naked mole-rat brain, *Proceedings of the National Academy of Sciences,* 99(8), 5692–5697.

Caves, E. M., Brandley, N. C. ve Johnsen, S. (2018) Visual acuity and the evolution of signals, *Trends in Ecology & Evolution,* 33(5), 358–372.

Ceballos, G., Ehrlich, P. R. ve Dirzo, R. (2017) Biological annihilation via the ongoing sixth mass extinction signaled by vertebrate population losses and declines, *Proceedings of the National Academy of Sciences,* 114(30), E6089–E6096.

Chappuis, C. J. ve diğ. (2013) Water vapour and heat combine to elicit biting and biting persistence in tsetse, *Parasites & Vectors,* 6(1), 240.

Chatigny, F. (2019) The controversy on fish pain: A veterinarian's perspective, *Journal of Applied Animal Welfare Science,* 22(4), 400–410.

Chen, P.-J. ve diğ. (2016) Extreme spectral richness in the eye of the common bluebottle butterfly, *Graphium sarpedon, Frontiers in Ecology and Evolution,* 4, 12.

Chen, Q. ve diğ. (2012) Reduced performance of prey targeting in pit vipers with contralaterally occluded infrared and visual senses, *PLOS One,* 7(5), e34989.

Chernetsov, N., Kishkinev, D. ve Mouritsen, H. (2008) A long-distance avian migrant compensates for longitudinal displacement during spring migration, *Current Biology,* 18(3), 188–190.

Chiou, T.-H. ve diğ. (2008) Circular polarization vision in a stomatopod crustacean, *Current Biology,* 18(6), 429–434.

Chiszar, D. ve diğ. (1983) Strike-induced chemosensory searching by rattlesnakes: The role of envenomation-related chemical cues in the post-strike environment, *Chemical signals in vertebrates* içinde, Müller-Schwarze, D. ve Silverstein, R. M. (haz.), 3:1–24. Boston: Springer.

Chiszar, D. ve diğ. (1999) Discrimination between envenomated and nonenvenomated prey by western diamondback rattlesnakes (*Crotalus atrox*): Chemosensory consequences of venom, *Copeia,* 1999(3), 640–648.

Chiszar, D., Walters, A. ve Smith, H. M. (2008) Rattlesnake preference for envenomated prey: Species specificity, *Journal of Herpetology,* 42(4), 764–767.

Chittka, L. (1997) Bee color vision is optimal for coding flower color, but flower colors are not optimal for being coded—why?, *Israel Journal of Plant Sciences,* 45(2–3), 115–127.

Chittka, L. ve Menzel, R. (1992) The evolutionary adaptation of flower colours and the insect pollinators' colour vision, *Journal of Comparative Physiology A,* 171(2), 171–181.

Chittka, L. ve Niven, J. (2009) Are bigger brains better?, *Current Biology,* 19(21), R995–R1008.

Chiu, C. ve Moss, C. F. (2008) When echolocating bats do not echolocate, *Communicative & Integrative Biology,* 1(2), 161–162.

Chiu, C., Xian, W. ve Moss, C. F. (2008) Flying in silence: Echolocating bats cease vocalizing to avoid sonar jamming, *Proceedings of the National Academy of Sciences,* 105(35), 13116– 13121.

Chiu, C., Xian, W. ve Moss, C. F. (2009) Adaptive echolocation behavior in bats for the analysis of auditory scenes, *Journal of Experimental Biology,* 212(9), 1392–1404.

Cinzano, P., Falchi, F. ve Elvidge, C. D. (2001) The first world atlas of the artificial night sky brightness, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society,* 328(3), 689–707.

Clark, C. J., LePiane, K. ve Liu, L. (2020) Evolution and ecology of silent flight in owls and other flying vertebrates, *Integrative Organismal Biology,* 2(1), obaa001.

Clark, C. W. ve Gagnon, G. C. (2004) Low-frequency vocal behaviors of baleen whales in the North Atlantic: Insights from IUSS detections, locations and tracking from 1992 to 1996, *Journal of Underwater Acoustics,* 52, 609–640.

Clark, G. A. ve de Cruz, J. B. (1989) Functional interpretation of protruding filoplumes in oscines, *The Condor,* 91(4), 962–965.

Clark, R. (2004) Timber rattlesnakes (*Crotalus horridus*) use chemical cues to select ambush sites, *Journal of Chemical Ecology,* 30(3), 607–617.

Clark, R. ve Ramirez, G. (2011) Rosy boas (*Lichanura trivirgata*) use chemical cues to identify female mice (*Mus musculus*) with litters of dependent young, *Herpetological Journal,* 21(3), 187–191.

Clarke, D. ve diğ.(2013) Detection and learning of floral electric fields by bumblebees, *Science,* 340(6128), 66–69.

Clarke, D., Morley, E. ve Robert, D. (2017) The bee, the flower, and the electric field: Elec- tric ecology and aerial electroreception, *Journal of Comparative Physiology A,* 203(9), 737– 748.

Cocroft, R. (1999) Offspring-parent communication in a subsocial treehopper (Hemiptera: Membracidae: *Umbonia crassicornis*), *Behaviour,* 136(1), 1–21.

Cocroft, R. B. (2011) The public world of insect vibrational communication, *Molecular Ecology,* 20(10), 2041–2043.

Cocroft, R. B. ve Rodríguez, R. L. (2005) The behavioral ecology of insect vibrational communication, *BioScience,* 55(4), 323–334.

Cohen, K. E. ve diğ. (2020) Knowing when to stick: Touch receptors found in the remora adhesive disc, *Royal Society Open Science,* 7(1), 190990.

Cohen, K. L., Seid, M. A. ve Warkentin, K. M. (2016) How embryos escape from danger: The mechanism of rapid, plastic hatching in red-eyed treefrogs, *Journal of Experimental Biology,* 219(12), 1875–1883.

Cokl, A. ve Virant-Doberlet, M. (2003) Communication with substrate-borne signals in small plant-dwelling insects, *Annual Review of Entomology,* 48, 29–50.

Cole, J. (2016) *Losing touch: A man without his body.* Oxford: Oxford University Press.
Collin, S. P. (2019) Electroreception in vertebrates and invertebrates, *Encyclopedia of animal behavior* içinde, Choe, J. C. (haz.), 2. basım., s. 120–131. Amsterdam: Elsevier.

Collin, S. P. ve diğ. (2009) The evolution of early vertebrate photoreceptors, *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences,* 364(1531), 2925–2940.

Collins, C. E., Hendrickson, A. ve Kaas, J. H. (2005) Overview of the visual system of Tarsius, *The Anatomical Record: Part A, Discoveries in Molecular, Cellular, and Evolutionary Biology,* 287(1), 1013–1025.

Colour Blind Awareness (n.d.) Living with Colour Vision Deficiency, Colour Blind Awareness. Erişim adresi: www.colourblindawareness.org/colour-blindness/living-with-colour-vision-deficiency/.

Conner, W. E. ve Corcoran, A. J. (2012) Sound strategies: The 65-million-year-old battle between bats and insects, *Annual Review of Entomology,* 57(1), 21–39.

Corbet, S. A., Beament, J., and Eisikowitch, D. (1982) Are electrostatic forces involved in pollen transfer?, *Plant, Cell & Environment,* 5(2), 125–129.

Çorcoran, A. J. ve diğ. (2011) How do tiger moths jam bat sonar?, *Journal of Experimental Biology,* 214(14), 2416–2425.

Corcoran, A. J., Barber, J. R. ve Conner, W. E. (2009) Tiger moth jams bat sonar, *Science,* 325(5938), 325–327.

Corcoran, A. J. ve Moss, C. F. (2017) Sensing in a noisy world: Lessons from auditory specialists, echolocating bats, *Journal of Experimental Biology,* 220(24), 4554–4566.

Corfas, R. A. ve Vosshall, L. B. (2015) The cation channel TRPA1 tunes mosquito thermotaxis to host temperatures, *eLife,* 4, e11750.

Costa, D. (1993) The secret life of marine mammals: Novel tools for studying their behavior and biology at sea, *Oceanography,* 6(3), 120–128.

Costa, D. ve Kooyman, G. (2011) Oxygen consumption, thermoregulation, and the effect of fur oiling and washing on the sea otter, *Enhydra lutris, Canadian Journal of Zoology,* 60(11), 2761–2767.

Cowart, L. (2021) *Hurts so good: The science and culture of pain on purpose.* New York: Public-Affairs.

Cox, J. J. ve diğ. (2006) An SCN9A channelopathy causes congenital inability to experience pain, *Nature,* 444(7121), 894–898.

Crampton, W. G. R. (2019) Electroreception, electrogenesis and electric signal evolution, *Journal of Fish Biology,* 95(1), 92–134.

Cranford, T. W., Amundin, M. ve Norris, K. S. (1996) Functional morphology and homology in the odontocete nasal complex: Implications for sound generation, *Journal of Morphology,* 228(3), 223–285.

Crapse, T. B. ve Sommer, M. A. (2008) Corollary discharge across the animal kingdom, *Nature Reviews Neuroscience,* 9(8), 587–600.

Craven, B. A., Paterson, E. G. ve Settles, G. S. (2010) The fluid dynamics of canine olfaction: Unique nasal airflow patterns as an explanation of macrosmia, *Journal of the Royal Society Interface,* 7(47), 933–943.

Crish, C., Crish, S. ve Comer, C. (2015) Tactile sensing in the naked mole rat, *Scholarpedia,* 10(3), 7164.

Cronin, T. W. (2018) A different view: Sensory drive in the polarized-light realm, *Current Zoology,* 64(4), 513–523.

Cronin, T. W. ve diğ. (2014) *Visual Ecology.* Princeton, NJ: Princeton University Press.

Cronin, T. W. ve Bok, M. J. (2016) Photoreception and vision in the ultraviolet, *Journal of Experimental Biology,* 219(18), 2790–2801.

Cronin, T. W. ve Marshall, N. J. (1989a) A retina with at least ten spectral types of photoreceptors in a mantis shrimp, *Nature,* 339(6220), 137–140.ß

Cronin, T. W. ve Marshall, N. J. (1989b) Multiple spectral classes of photoreceptors in the retinas of gonodactyloid stomatopod crustaceans, *Journal of Comparative Physiology A,* 166(2), 261–275.

Cronin, T. W., Marshall, N. J. ve Caldwell, R. L. (2017) Stomatopod vision, *Oxford research encyclopedia of neuroscience* içinde, Sherman, S. M. (haz.), New York: Oxford University Press. Erişim adresi: oxfordre.com/neuroscience/view/10.1093/acrefore/9780190264086.001.0001/ acrefore-9780190264086-e-157.

Cronon, W. (1996) The trouble with wilderness; Or, getting back to the wrong nature, *Environmental History,* 1(1), 7–28.

Crook, R. J. (2021) Behavioral and neurophysiological evidence suggests affective pain experience in octopus, *iScience,* 24(3), 102229.

Crook, R. J. ve diğ. (2011) Peripheral injury induces long-term sensitization of defensive responses to visual and tactile stimuli in the squid *Loligo pealeii,* Lesueur 1821, *Journal of Experimental Biology,* 214(19), 3173–3185.

Crook, R. J. ve diğ. (2014) Nociceptive sensitization reduces predation risk, *Current Biology,* 24(10), 1121–1125.

Crook, R. J., Hanlon, R. T. ve Walters, E. T. (2013) Squid have nociceptors that display widespread long-term sensitization and spontaneous activity after bodily injury, *Journal of Neuroscience,* 33(24), 10021–10026.

Crook, R. J. ve Walters, E. T. (2014) Neuroethology: Self-recognition helps octopuses avoid entanglement, *Current Biology,* 24(11), R520–R521.

Cross, F. R. ve diğ. (2020) Arthropod intelligence? The case for Portia, *Frontiers in Psychology,* 11.

Crowe-Riddell, J. M., Simões, B. F. ve diğ. (2019) Phototactic tails: Evolution and molecular basis of a novel sensory trait in sea snakes, *Molecular Ecology,* 28(8), 2013–2028.

Crowe-Riddell, J. M., Williams, R. ve diğ. (2019) Ultrastructural evidence of a mechanosensory function of scale organs (sensilla) in sea snakes (Hydrophiinae), *Royal Society Open Science,* 6(4), 182022.

Cullen, K. E. (2004) Sensory signals during active versus passive movement, *Current Opinion in Neurobiology,* 14(6), 698–706.

Cummings, M. E., Rosenthal, G. G. ve Ryan, M. J. (2003) A private ultraviolet channel in visual communication, *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences,* 270(1518), 897– 904.

Cunningham, S. ve diğ. (2010) Bill morphology of ibises suggests a remote-tactile sensory system for prey detection, *The Auk,* 127(2), 308–316.

Cunningham, S., Castro, I. ve Alley, M. (2007) A new prey-detection mechanism for kiwi (*Apteryx* spp.) suggests convergent evolution between paleognathous and neognathous birds, *Journal of Anatomy,* 211(4), 493–502.

Cunningham, S. J., Alley, M. R. ve Castro, I. (2011) Facial bristle feather histology and morphology in New Zealand birds: Implications for function, *Journal of Morphology,* 272(1), 118–128.

Cuthill, I. C.,ve diğ. (2017) The biology of color, *Science,* 357(6350), eaan0221.

Czaczkes, T. J. ve diğ. (2018) Reduced light avoidance in spiders from populations in light-polluted urban environments, *Naturwissenschaften,* 105(11–12), 64.

Czech-Damal, N. U. ve diğ. (2012) Electroreception in the Guiana dolphin (*Sotalia guianensis*), *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences,* 279(1729), 663–668.

Czech-Damal, N. U. ve diğ. (2013) Passive electroreception in aquatic mammals, *Journal of Comparative Physiology A,* 199(6), 555–563.

Daan, S., Barnes, B. M. ve Strijkstra, A. M. (1991) Warming up for sleep? Ground squirrels sleep during arousals from hibernation, *Neuroscience Letters,* 128(2), 265–268.

Daly, I. ve diğ. (2016) Dynamic polarization vision in mantis shrimps, *Nature Communications,* 7, 12140.

Daly, I. M. ve diğ. (2018) Complex gaze stabilization in mantis shrimp, *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences,* 285(1878), 20180594.

Dangles, O., Casas, J. ve Coolen, I. (2006) Textbook cricket goes to the field: The ecological scene of the neuroethological play, *Journal of Experimental Biology,* 209(3), 393–398.

Darwin, C. (1871) *The descent of man, and selection in relation to sex.* Londra: J. Murray.

Darwin, C. (1890) *The formation of vegetable mould, through the action of worms, with observations on their habits.* New York: D. Appleton and Company.

Darwin, C. (1958) *The origin of species by means of natural selection.* New York: Signet.

De Brito Sanchez, M. G. ve diğ. (2014) The tarsal taste of honey bees: Behavioral and electrophysiological analyses, *Frontiers in Behavioral Neuroscience,* 8.

Degen, T. ve diğ. (2016) Street lighting: Sex-independent impacts on moth movement, *Journal of Animal Ecology,* 85(5), 1352–1360.

DeGennaro, M. ve diğ. (2013) *Orco* mutant mosquitoes lose strong preference for humans and are not repelled by volatile DEET, *Nature,* 498(7455), 487–491.

Dehnhardt, G. ve diğ. (2001) Hydrodynamic trail-following in harbor seals (*Phoca vitulina*), *Science,* 293(5527), 102–104.

Dehnhardt, G., Mauck, B. ve Hyvärinen, H. (1998) Ambient temperature does not affect the tactile sensitivity of mystacial vibrissae in harbour seals, *Journal of Experimental Biology,* 201(22), 3023–3029.

Dennis, E. J., Goldman, O. V. ve Vosshall, L. B. (2019) *Aedes aegypti* mosquitoes use their legs to sense DEET on contact, *Current Biology,* 29(9), 1551–1556.e5.

Derryberry, E. P. ve diğ. (2020) Singing in a silent spring: Birds respond to a half-century soundscape reversion during the COVID-19 shutdown, *Science,* 370(6516), 575–579.

DeRuiter, S. L. ve diğ. (2013) First direct measurements of behavioural responses by Cuvier's beaked whales to mid-frequency active sonar, *Biology Letters,* 9(4), 20130223.

De Santana, C. D. ve diğ. (2019) Unexpected species diversity in electric eels with a description of the strongest living bioelectricity generator, *Nature Communications,* 10(1), 4000.

D'Estries, M. (2019) This bat-friendly town turned the night red, *Treehugger.* Erişim adresi : www.treehugger.com/worlds-first-bat-friendly-town-turns-night-red-4868381.

D'Ettorre, P. (2016) Genomic and brain expansion provide ants with refined sense of smell, *Proceedings of the National Academy of Sciences,* 113(49), 13947–13949.

Deutschlander, M. E., Borland, S. C. ve Phillips, J. B. (1999) Extraocular magnetic compass in newts, *Nature,* 400(6742), 324–325.

Diderot, D. (1749) Lettre sur les aveugles à l'usage de ceux qui voient. Ertişim adresi: www.google.com/books/edition/Lettre_sur_les_aveugles/W3oHAAAAQAAJ?hl=en&gbpv=1.

Dijkgraaf, S. (1963) The functioning and significance of the lateral-line organs, *Biological Reviews,* 38(1), 51–105.

Dijkgraaf, S. (1989) A short personal review of the history of lateral line research, *The mechanosensory lateral line* içinde, Coombs, S., Görner, P. ve Münz, H. (haz.), s. 7–14. New York: Springer.

Dijkgraaf, S. ve Kalmijn, A. J. (1962) Verhaltensversuche zur Funktion der Lorenzinischen Ampullen, *Naturwissenschaften,* 49, 400.

Dinets, V. (2016) No cortex, no cry, *Animal Sentience,* 1(3).

Di Silvestro, R. (2012) Spider-Man vs the real deal: Spider powers, National Wildlife Foundation blog. Erişim adresi: blog.nwf.org/2012/06/spiderman-vs-the-real-deal-spider-powers/.

Dominoni, D. M. ve diğ. (2020) Why conservation biology can benefit from sensory ecology, *Nature Ecology & Evolution,* 4(4), 502–511.

Dominy, N. J. ve Lucas, P. W. (2001) Ecological importance of trichromatic vision to primates, *Nature,* 410(6826), 363–366.

Dominy, N. J., Svenning, J.-C. ve Li, W.-H. (2003) Historical contingency in the evolution of primate color vision, *Journal of Human Evolution,* 44(1), 25–45.

Dooling, R. J. ve diğ. (2002) Auditory temporal resolution in birds: Discrimination of harmonic complexes, *Journal of the Acoustical Society of America,* 112(2), 748–759.

Dooling, R. J., Lohr, B. ve Dent, M. L. (2000) Hearing in birds and reptiles, *Comparative hearing: Birds and reptiles* içinde, Dooling, R. J., Fay, R. R. ve Popper, A. N. (haz.), s. 308–359. New York: Springer.

Dooling, R. J. ve Prior, N. H. (2017) Do we hear what birds hear in birdsong?, *Animal Behaviour,* 124, 283–289.

Douglas, R. H. ve Jeffery, G. (2014) The spectral transmission of ocular media suggests ultraviolet sensitivity is widespread among mammals, *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences,* 281(1780), 20132995.

Dreyer, D. ve diğ. (2018) The Earth's magnetic field and visual landmarks steer migratory flight behavior in the nocturnal Australian bogong moth, *Current Biology,* 28(13), 2160–2166.e5.

Du, W.-G. ve diğ. (2011) Behavioral thermoregulation by turtle embryos, *Proceedings of the National Academy of Sciences,* 108(23), 9513–9515.

Duarte, C. M. ve diğ. (2021) The soundscape of the Anthropocene ocean, *Science,* 371(6529), eaba4658.

Dunlop, R. ve Laming, P. (2005) Mechanoreceptive and nociceptive responses in the central nervous system of goldfish (*Carassius auratus*) and trout (*Oncorhynchus mykiss*), *Journal of Pain,* 6(9), 561–568.

Dunning, D. C. ve Roeder, K. D. (1965) Moth sounds and the insect-catching behavior of bats, *Science,* 147(3654), 173–174.

Duranton, C. ve Horowitz, A. (2019) Let me sniff ! Nosework induces positive judgment bias in pet dogs, *Applied Animal Behaviour Science,* 211, 61–66.

Durso, A. (2013) Non-toxic venoms?, *Life is short, but snakes are long* (blog). Erişim adresi: snakesarelong.blogspot.com/2013/03/non-toxic-venoms.html.

Dusenbery, D. B. (1992) *Sensory ecology: How organisms acquire and respond to information.* New York: W. H. Freeman.

Dusenbery, M. (2018) *Doing harm: The truth about how bad medicine and lazy science leave women dismissed, misdiagnosed, and sick.* New York: HarperOne.

Eaton, J. (2014) When it comes to smell, the turkey vulture stands (nearly) alone, *Bay Nature.* Erişim adresi: baynature.org/article/comes-smell-turkey-vulture-stands-nearly-alone/.

Eaton, M. D. (2005) Human vision fails to distinguish widespread sexual dichromatism among sexually "monochromatic" birds, *Proceedings of the National Academy of Sciences,* 102(31), 10942–10946.

Ebert, J. ve Westhoff, G. (2006) Behavioural examination of the infrared sensitivity of rattle-snakes (*Crotalus atrox*), *Journal of Comparative Physiology A,* 192(9), 941–947.

Edelman, N. B. ve diğ. (2015) No evidence for intracellular magnetite in putative vertebrate magnetoreceptors identified by magnetic screening, *Proceedings of the National Academy of Sciences,* 112(1), 262–267.

Eder, S. H. K. ve diğ. (2012) Magnetic characterization of isolated candidate vertebrate magnetoreceptor cells, *Proceedings of the National Academy of Sciences,* 109(30), 12022–12027.

Einwich, A. ve diğ. (2020) A novel isoform of cryptochrome 4 (Cry4b) is expressed in the retina of a night-migratory songbird, *Scientific Reports,* 10(1), 15794.

Eisemann, C. H. ve diğ. (1984) Do insects feel pain? A biological view, *Experientia,* 40(2), 164–167.

Eisenberg, J. F. ve Gould, E. (1966) The behavior of *Solenodon paradoxus* in captivity with comments on the behavior of other insectivora, *Zoologica,* 51(4), 49–60.

Eisthen, H. L. (2002) Why are olfactory systems of different animals so similar?, *Brain, Behavior and Evolution,* 59(5–6), 273–293.

Elemans, C. P. H. ve diğ. (2011) Superfast muscles set maximum call rate in echolocating bats, *Science,* 333(6051), 1885–1888.

Elwood, R. W. (2011) Pain and suffering in invertebrates?, *ILAR Journal,* 52(2), 175–184.

Elwood, R. W. (2019) Discrimination between nociceptive reflexes and more complex responses consistent with pain in crustaceans, *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences,* 374(1785), 20190368.

Elwood, R. W. ve Appel, M. (2009) Pain experience in hermit crabs?, *Animal Behaviour,* 77(5), 1243–1246.

Embar, K. ve diğ. (2018) Pit fights: Predators in evolutionarily independent communities, *Journal of Mammalogy,* 99(5), 1183–1188.

Emerling, C. A. ve Springer, M. S. (2015) Genomic evidence for rod monochromacy in sloths and armadillos suggests early subterranean history for *Xenarthra, Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences,* 282(1800), 20142192.

Engels, S. ve diğ. (2012) Night-migratory songbirds possess a magnetic compass in both eyes, *PLOS One,* 7(9), e43271.

Engels, S. ve diğ. (2014) Anthropogenic electromagnetic noise disrupts magnetic compass orientation in a migratory bird, *Nature,* 509(7500), 353–356.

Erbe, C. ve diğ. (2019) The effects of ship noise on marine mammals—A review, *Frontiers in Marine Science,* 6, 606.

Erbe, C., Dunlop, R. ve Dolman, S. (2018) Effects of noise on marine mammals, *Effects of anthropogenic noise on animals* içinde, Slabbekoorn, H. ve diğ. (haz.), s. 277–309. New York: Springer.

Eriksson, A. ve diğ. (2012) Exploitation of insect vibrational signals reveals a new method of pest management, *PLOS One,* 7(3), e32954.

Etheredge, J. A. ve diğ. (1999) Monarch butterflies (*Danaus plexippus* L.) use a magnetic compass for navigation, *Proceedings of the National Academy of Sciences,* 96(24), 13845–13846.

Evans, J. E. ve diğ. (2012) Short-term physiological and behavioural effects of high-versus low-frequency fluorescent light on captive birds, *Animal Behaviour,* 83(1), 25–33.

Falchi, F. ve diğ. (2016) The new world atlas of artificial night sky brightness, *Science Advances,* 2(6), e1600377.

Fedigan, L. M. ve diğ. (2014) The heterozygote superiority hypothesis for polymorphic color vision is not supported by long-term fitness data from wild neotropical monkeys, *PLOS One,* 9(1), e84872.

Feller, K. D. ve diğ. (2021) Surf and turf vision: Patterns and predictors of visual acuity in compound eye evolution, *Arthropod Structure & Development,* 60, 101002.

Fenton, M. B. ve diğ. (haz.), (2016) *Bat bioacoustics.* New York: Springer.

Fenton, M. B., Faure, P. A. ve Ratcliffe, J. M. (2012) Evolution of high duty cycle echolocation in bats, *Journal of Experimental Biology,* 215(17), 2935–2944.

Fertin, A. ve Casas, J. (2007) Orientation towards prey in antlions: Efficient use of wave propagation in sand, *Journal of Experimental Biology,* 210(19), 3337–3343.

Feynman, R. (1964) *The Feynman Lectures on Physics,* cilt II, bölüm 9, *Electricity in the Atmosphere.* Erişim adresi: www.feynmanlectures.caltech.edu/II_09.html.

Finger, S. ve Piccolino, M. (2011) *The shocking history of electric fishes: From ancient epochs to the birth of modern neurophysiology.* New York: Oxford University Press.

Finkbeiner, S. D. ve diğ. (2017) Ultraviolet and yellow reflectance but not fluorescence is important for visual discrimination of conspecifics by *Heliconius erato, Journal of Experimental Biology,* 220(7), 1267–1276.

Finneran, J. J. (2013) Dolphin "packet" use during long-range echolocation tasks, *Journal of the Acoustical Society of America,* 133(3), 1796–1810.

Firestein, S. (2005) A Nobel nose: The 2004 Nobel Prize in Physiology and Medicine, *Neuron,* 45(3), 333–338.

Fishbein, A. R. ve diğ. (2020) Sound sequences in birdsong: How much do birds

really care?, *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences,* 375(1789), 20190044.

Fleissner, G. ve diğ. (2003) Ultrastructural analysis of a putative magnetoreceptor in the beak of homing pigeons, *Journal of Comparative Neurology,* 458(4), 350–360.

Fleissner, G. ve diğ. (2007) A novel concept of Fe-mineral-based magnetoreception: Histological and physicochemical data from the upper beak of homing pigeons, *Naturwissenschaften,* 94(8), 631–642.

Forbes, A. A. ve diğ. (2018) Quantifying the unquantifiable: Why Hymenoptera, not Coleoptera, is the most speciose animal order, *BMC Ecology,* 18(1), 21.

Ford, N. B. ve Low, J. R. (1984) Sex pheromone source location by garter snakes, *Journal of Chemical Ecology,* 10(8), 1193–1199.

Forel, A. (1874) *Les fourmis de la Suisse: Systématique, notices anatomiques et physiologiques, architecture, distribution géographique, nouvelles expériences et observations de moeurs.* Zurich: Druck von Zürcher & Furrer.

Fournier, J. P. ve diğ. (2013) If a bird flies in the forest, does an insect hear it?, *Biology Letters,* 9(5), 20130319.

Fox, R., Lehmkuhle, S. W. ve Westendorf, D. H. (1976) Falcon visual acuity, *Science,* 192(4236), 263–265.

Francis, C. D. ve diğ. (2012) Noise pollution alters ecological services: Enhanced pollination and disrupted seed dispersal, *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences,* 279(1739), 2727–2735.

Francis, C. D. ve diğ. (2017) Acoustic environments matter: Synergistic benefits to humans and ecological communities, *Journal of Environmental Management,* 203(Pt 1), 245–254.

Fransson, T. ve diğ. (2001) Magnetic cues trigger extensive refuelling, *Nature,* 414(6859), 35–36.

Friis, I., Sjulstok, E. ve Solov'yov, I. A. (2017) Computational reconstruction reveals a candidate magnetic biocompass to be likely irrelevant for magnetoreception, *Scientific Reports,* 7(1), 13908.

Frisk, G. V. (2012) Noiseonomics: The relationship between ambient noise levels in the sea and global economic trends, *Scientific Reports,* 2(1), 437.

Fritsches, K. A., Brill, R. W. ve Warrant, E. J. (2005) Warm eyes provide superior vision in swordfishes, *Current Biology,* 15(1), 55–58.

Fukutomi, M. ve Carlson, B. A. (2020) A history of corollary discharge: Contributions of mormyrid weakly electric fish, *Frontiers in Integrative Neuroscience,* 14, 42.

Fullard, J. H. ve Yack, J. E. (1993) The evolutionary biology of insect hearing, *Trends in Ecology & Evolution,* 8(7), 248–252.

Gagliardo, A. ve diğ. (2013) Oceanic navigation in Cory's shearwaters: Evidence for a crucial role of olfactory cues for homing after displacement, *Journal of Experimental Biology,* 216(15), 2798–2805.

Gagnon, Y. L. ve diğ. (2015) Circularly polarized light as a communication signal in mantis shrimps, *Current Biology,* 25(23), 3074–3078.

Gal, R. ve diğ. (2014) Sensory arsenal on the stinger of the parasitoid jewel wasp and its possible role in identifying cockroach brains, *PLOS One,* 9(2), e89683.

Galambos, R. ve Griffin, D. R. (1942) Obstacle avoidance by flying bats: The cries of bats, *Journal of Experimental Zoology,* 89(3), 475–490.

Gall, M. D., Salameh, T. S. ve Lucas, J. R. (2013) Songbird frequency selectivity and temporal resolution vary with sex and season, *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences,* 280(1751), 20122296.

Gall, M. D. ve Wilczynski, W. (2015) Hearing conspecific vocal signals alters peripheral auditory sensitivity, *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences,* 282(1808), 20150749.

Garcia-Larrea, L. ve Bastuji, H. (2018) Pain and consciousness, *Progress in Neuro-Psychopharmacology and Biological Psychiatry,* 87(Pt B), 193–199.

Gardiner, J. M. ve diğ. (2014) Multisensory integration and behavioral plasticity in sharks from different ecological niches, *PLOS One,* 9(4), e93036.

Garm, A. ve Nilsson, D.-E. (2014) Visual navigation in starfish: First evidence for the use of vision and eyes in starfish, *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences,* 281(1777), 20133011.

Garstang, M. ve diğ. (1995) Atmospheric controls on elephant communication, *Journal of Experimental Biology,* 198(Pt 4), 939–951.

Gaspard, J. C. ve diğ. (2017) Detection of hydrodynamic stimuli by the postcranial body of Florida manatees (*Trichechus manatus latirostris*), *Journal of Comparative Physiology A,* 203(2), 111–120.

Gaston, K. J. (2019) Nighttime ecology: The "nocturnal problem" revisited, *The American Naturalist,* 193(4), 481–502.

Gavelis, G. S. ve diğ. (2015) Eye-like ocelloids are built from different endosymbiotically acquired components, *Nature,* 523(7559), 204–207.

Gehring, J., Kerlinger, P. ve Manville, A. (2009) Communication towers, lights, and birds: Successful methods of reducing the frequency of avian collisions, *Ecological Applications,* 19(2), 505–514.

Gehring, W. J. ve Wehner, R. (1995) Heat shock protein synthesis and thermotolerance in *Cataglyphis,* an ant from the Sahara desert, *Proceedings of the National Academy of Sciences,* 92(7), 2994–2998.

Geipel, I. ve diğ. (2019) Bats actively use leaves as specular reflectors to detect acoustically camouflaged prey, *Current Biology,* 29(16), 2731–2736.e3.

Geipel, I., Jung, K. ve Kalko, E. K. V. (2013) Perception of silent and motionless prey on vegetation by echolocation in the gleaning bat *Micronycteris microtis, Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences,* 280(1754), 20122830.

Geiser, F. (2013) Hibernation, *Current Biology,* 23(5), R188–R193.

Gentle, M. J. ve Breward, J. (1986) The bill tip organ of the chicken (*Gallus gallus* var. *domesticus*), *Journal of Anatomy,* 145, 79–85.

Ghose, K., Moss, C. F. ve Horiuchi, T. K. (2007) Flying big brown bats emit a beam with two lobes in the vertical plane, *Journal of the Acoustical Society of America,* 122(6), 3717– 3724.

Gil, D. ve diğ. (2015) Birds living near airports advance their dawn chorus and reduce overlap with aircraft noise, *Behavioral Ecology,* 26(2), 435–443.

Gill, A. B. ve diğ. (2014) Marine renewable energy, electromagnetic (EM) fields and EM-sensitive animals, *Marine renewable energy technology and environmental interactions* içinde, Shields, M. A. ve Payne, A. I. L. (haz.), s. 61–79. Dordrecht: Springer.

Gläser, N. ve Kröger, R. H. H. (2017) Variation in rhinarium temperature indicates sensory specializations in placental mammals, *Journal of Thermal Biology,* 67, 30–34.

Godfrey-Smith, P. (2016) *Other minds: The octopus, the sea, and the deep origins of consciousness.* New York: Farrar, Straus and Giroux; Türkçesi: *Başka Zihinler: Ahtapot, Deniz ve Bilincin Derinlerdeki Kökleri*, çev. Belgin Selen Haktanır, İstanbul: Siyah Kitap, 2020.

Goerlitz, H. R. ve diğ. (2010) An aerial-hawking bat uses stealth echolocation to counter moth hearing, *Current Biology,* 20(17), 1568–1572.

Goldberg, Y. P. ve diğ. (2012) Human Mendelian pain disorders: A key to discovery and validation of novel analgesics, *Clinical Genetics,* 82(4), 367–373.

Goldbogen, J. A. ve diğ. (2019) Extreme bradycardia and tachycardia in the world's largest animal, *Proceedings of the National Academy of Sciences,* 116(50), 25329–25332.

Gol'din, P. (2014) "Antlers inside": Are the skull structures of beaked whales (Cetacea: Ziphi- idae) used for echoic imaging and visual display?, *Biological Journal of the Linnean Society,* 113(2), 510–515.

Goldsmith, T. H. (1980) Hummingbirds see near ultraviolet light, *Science,* 207(4432), 786–788. Gonzalez-Bellido, P. T., Wardill, T. J. ve Juusola, M. (2011) Compound eyes and retinal information processing in miniature dipteran species match their specific ecological demands, *Proceedings of the National Academy of Sciences,* 108(10), 4224–4229.

Göpfert, M. C. ve Hennig, R. M. (2016) Hearing in insects, *Annual Review of Entomology,* 61, 257–276.

Göpfert, M. C., Surlykke, A. ve Wasserthal, L. T. (2002) Tympanal and atympanal "mouth-ears" in hawkmoths (Sphingidae), *Proceedings of the Royal Academy B: Biological Sciences,* 269(1486), 89–95.

Gordon, T. A. C. ve diğ. (2018) Habitat degradation negatively affects auditory settlement behavior of coral reef fishes, *Proceedings of the National Academy of Sciences,* 115(20), 5193–5198.

Gordon, T. A. C. ve diğ. (2019) Acoustic enrichment can enhance fish community development on degraded coral reef habitat, *Nature Communications,* 10(1), 5414.

Gorham, P. W. (2013) Ballooning spiders: The case for electrostatic flight, arXiv:1309.4731. Goris, R. C. (2011) Infrared organs of snakes: An integral part of vision, *Journal of Herpetology,* 45(1), 2–14.

Goté, J. T. ve diğ. (2019) Growing tiny eyes: How juvenile jumping spiders retain high visual performance in the face of size limitations and developmental constraints, *Vision Research,* 160, 24–36.

Gould, E. (1965) Evidence for echolocation in the Tenrecidae of Madagascar, *Proceedings of the American Philosophical Society,* 109(6), 352–360.

Goutte, S. ve diğ. (2017) Evidence of auditory insensitivity to vocalization frequencies in two frogs, *Scientific Reports,* 7(1), 12121.

Gracheva, E. O. ve diğ. (2010) Molecular basis of infrared detection by snakes, *Nature,* 464(7291), 1006–1011.

Gracheva, E. O. ve diğ. (2011) Ganglion-specific splicing of TRPV1 underlies infrared sensation in vampire bats, *Nature,* 476(7358), 88–91.

Gracheva, E. O. ve Bagriantsev, S. N. (2015) Evolutionary adaptation to thermosensation, *Current Opinion in Neurobiology,* 34, 67–73.

Granger, J. ve diğ. (2020) Gray whales strand more often on days with increased levels of atmospheric radio-frequency noise, *Current Biology,* 30(4), R155–R156.

Grant, R. A., Breakell, V. ve Prescott, T. J. (2018) Whisker touch sensing guides locomotion in small, quadrupedal mammals, *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences,* 285(1880), 20180592.

Grant, R. A., Sperber, A. L. ve Prescott, T. J. (2012) The role of orienting in vibrissal touch sensing, *Frontiers in Behavioral Neuroscience,* 6, 39.

Grasso, F. W. (2014) The octopus with two brains: How are distributed and central representations integrated in the octopus central nervous system?, *Cephalopod cognition* içinde, Darmaillacq, A.-S., Dickel, L. ve Mather, J. (haz.), s. 94–122. Cambridge: Cambridge University Press.

Graziadei, P. P. ve Gagne, H. T. (1976) Sensory innervation in the rim of the octopus sucker, *Journal of Morphology,* 150(3), 639–679.

Greenwood, V. (2012) The humans with super human vision, *Discover Magazine.* Erişim adresi: www.discovermagazine.com/mind/the-humans-with-super-human-vision.

Gregory, J. E. ve diğ. (1989) Responses of electroreceptors in the snout of the echidna, *Journal of Physiology,* 414, 521–538.

Greif, S. ve diğ. (2017) Acoustic mirrors as sensory traps for bats, *Science,* 357(6355), 1045–1047.

Griffin, D. R. (1944a) Echolocation by blind men, bats and radar, *Science,* 100(2609), 589–590.

Griffin, D. R. (1944b) The sensory basis of bird navigation, *The Quarterly Review of Biology,* 19(1), 15–31.

Griffin, D. R. (1953) Bat sounds under natural conditions, with evidence for echolocation of insect prey, *Journal of Experimental Zoology,* 123(3), 435–465.

Griffin, D. R. (1974) *Listening in the dark: The acoustic orientation of bats and men.* New York: Dover Publications.

Griffin, D. R. (2001) Return to the magic well: Echolocation behavior of bats and responses of insect prey, *BioScience,* 51(7), 555–556.

Griffin, D. R. ve Galambos, R. (1941) The sensory basis of obstacle avoidance by flying bats, *Journal of Experimental Zoology,* 86(3), 481–506.

Griffin, D. R., Webster, F. A. ve Michael, C. R. (1960) The echolocation of flying insects by bats, *Animal Behaviour,* 8(3), 141–154.

Grinnell, A. D. (1966) Mechanisms of overcoming interference in echolocating animals, *Animal Sonar Systems: Biology and Bionics* içinde, Busnel, R.-G. (haz.), 1, 451–480.

Grinnell, A .D., Gould, E. ve Fenton, M. B. (2016) A history of the study of echolocation, *Bat bioacoustics* içinde, Fenton, M. B. ve diğ. (haz.), s. 1–24. New York: Springer.

Grinnell, A. D. ve Griffin, D. R. (1958) The sensitivity of echolocation in bats, *Biological Bulletin,* 114(1), 10–22.

Gross, K., Pasinelli, G. ve Kunc, H. P. (2010) Behavioral plasticity allows short-term adjustment to a novel environment, *The American Naturalist,* 176(4), 456–464.

Grüsser, O.-J. (1994) Early concepts on efference copy and reafference, *Behavioral and Brain Sciences,* 17(2), 262–265.

Gu, J.-J. ve diğ. (2012) Wing stridulation in a Jurassic katydid (Insecta, Orthoptera) produced low-pitched musical calls to attract females, *Proceedings of the National Academy of Sciences,* 109(10), 3868–3873.

Günther, R. H., O'Connell-Rodwell, C. E. ve Klemperer, S. L. (2004) Seismic waves from elephant vocalizations: A possible communication mode?, *Geophysical Research Letters,* 31(11).

Gutnick, T. ve diğ. (2011) *Octopus vulgaris* uses visual information to determine the location of its arm, *Current Biology,* 21(6), 460–462. Hagedorn, M. (2004) Essay: The lure of field research on electric fish, *The senses of fish: Adaptations for the reception of natural stimuli* içinde, von der Emde,

G., Mogdans, J. ve Kapoor, B. G. (haz.), s. 362–368. Dordrecht: Springer. Hagedorn, M. ve Heiligenberg, W. (1985) Court and spark: Electric signals in the courtship and mating of gymnotoid fish, *Animal Behaviour,* 33(1), 254–265.

Hager, F. A. ve Kirchner, W. H. (2013) Vibrational long-distance communication in the termites *Macrotermes natalensis* and *Odontotermes* sp., *Journal of Experimental Biology,* 216(17), 3249–3256.

Hager, F. A. ve Krausa, K. (2019) Acacia ants respond to plant-borne vibrations caused by mammalian browsers, *Current Biology,* 29(5), 717–725.e3.

Halfwerk, W. ve diğ. (2019) Adaptive changes in sexual signalling in response to urbanization, *Nature Ecology & Evolution,* 3(3), 374–380.

Hamel, J. A. ve Cocroft, R. B. (2012) Negative feedback from maternal signals reduces false alarms by collectively signalling offspring, *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences,* 279(1743), 3820–3826.

Han, C. S. ve Jablonski, P. G. (2010) Male water striders attract predators to intimidate females into copulation, *Nature Communications,* 1(1), 52.

Hanke, F. D. ve Kelber, A. (2020) The eye of the common octopus (*Octopus vulgaris*), *Frontiers in Physiology,* 10, 1637.

Hanke, W. ve diğ. (2010) Harbor seal vibrissa morphology suppresses vortex-induced vibrations, *Journal of Experimental Biology,* 213(15), 2665–2672.

Hanke, W. ve Dehnhardt, G. (2015) Vibrissal touch in pinnipeds, *Scholarpedia,* 10(3), 6828.

Hanke, W., Römer, R. ve Dehnhardt, G. (2006) Visual fields and eye movements in a harbor seal (*Phoca vitulina*), *Vision Research,* 46(17), 2804–2814.

Hardy, A. R. ve Hale, M. E. (2020) Sensing the structural characteristics of surfaces: Texture encoding by a bottom-dwelling fish, *Journal of Experimental Biology,* 223(21), jeb227280.

Harley, H. E., Roitblat, H. L.,ve Nachtigall, P. E. (1996) Object representation in the bottle-nose dolphin (*Tursiops truncatus*): Integration of visual and echoic information, *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes,* 22(2), 164–174.

Hart, N. S. ve diğ. (2011) Microspectrophotometric evidence for cone monochromacy in sharks, *Naturwissenschaften,* 98(3), 193–201.

Hartline, P. H., Kass, L. ve Loop, M. S. (1978) Merging of modalities in the optic tectum: Infrared and visual integration in rattlesnakes, *Science,* 199(4334), 1225–1229.

Hartzell, P. L. ve diğ. (2011) Distribution and phylogeny of glacier ice worms (*Mesenchytraeus solifugus* and *Mesenchytraeus solifugus rainierensis*), *Canadian Journal of Zoology,* 83(9), 1206–1213.

Haspel, G. ve diğ. (2012) By the teeth of their skin, cavefish find their way, *Current Biology,* 22(16), R629–R630.

Haynes, K. F. ve diğ. (2002) Aggressive chemical mimicry of moth pheromones by a bolas spider: How does this specialist predator attract more than one species of prey?, *Chemoecology,* 12(2), 99–105.

Healy, K. ve diğ. (2013) Metabolic rate and body size are linked with perception of temporal information, *Animal Behaviour,* 86(4), 685–696.

Heffner, H. E. (1983) Hearing in large and small dogs: Absolute thresholds and size of the tympanic membrane, *Behavioral Neuroscience,* 97(2), 310–318.

Heffner, H. E. ve Heffner, R. S. (2018) The evolution of mammalian hearing, in *To the ear and back again—Advances in auditory biophysics: Proceedings of the 13th Mechanics of Hearing Workshop,* St. Catharines, Kanada, 130001. Erişim adresi: aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/ 1.5038516.

Heffner, R. S. ve Heffner, H. E. (1985) Hearing range of the domestic cat, *Hearing Research,* 19(1), 85–88.

Hein, C. M. ve diğ. (2011) Robins have a magnetic compass in both eyes, *Nature,* 471(7340), E1.

Heinrich, B. (1993) *The hot-blooded insects: Strategies and mechanisms of thermoregulation.* Berlin: Springer.

Henninger, J. ve diğ. (2018) Statistics of natural communication signals observed in the wild identify important yet neglected stimulus regimes in weakly electric fish, *Journal of Neuroscience,* 38(24), 5456–5465.

Henry, K. S. ve diğ. (2011) Songbirds tradeoff auditory frequency resolution and temporal resolution, *Journal of Comparative Physiology A,* 197(4), 351–359.

Henson, O. W. (1965) The activity and function of the middle-ear muscles in echo-locating bats, *Journal of Physiology,* 180(4), 871–887.

Hepper, P. G. (1988) The discrimination of human odour by the dog, *Perception,* 17(4), 549–554.

Hepper, P. G. ve Wells, D. L. (2005) How many footsteps do dogs need to determine the direction of an odour trail?, *Chemical Senses,* 30(4), 291–298.

Herberstein, M. E., Heiling, A. M. ve Cheng, K. (2009) Evidence for UV-based sensory exploitation in Australian but not European crab spiders, *Evolutionary Ecology,* 23(4), 621–634.

Heyers, D. ve diğ. (2007) A visual pathway links brain structures active during magnetic compass orientation in migratory birds, *PLOS One,* 2(9), e937.

Hildebrand, J. (2005) Impacts of anthropogenic sound, *Marine mammal research: Conservation beyond crisis* içinde, Reynolds, J. E. ve diğ. (haz.), s. 101–124. Baltimore: Johns Hopkins University Press.

Hill, P. S. M. (2008) *Vibrational communication in animals.* Cambridge, MA: Harvard University Press.

Hill, P. S. M. (2009) How do animals use substrate-borne vibrations as an information source?, *Naturwissenschaften,* 96(12), 1355–1371.

Hill, P. S. M. (2014) Stretching the paradigm or building a new? Development of a cohesive language for vibrational communication, *Studying vibrational communication* içinde, Cocroft, R. B. ve diğ. (haz.), s. 13–30. Berlin: Springer.

Hill, P. S. M. ve Wessel, A. (2016) Biotremology, *Current Biology,* 26(5), R187–R191.

Hines, H. M. ve diğ. (2011) Wing patterning gene redefines the mimetic history of *Heliconius* butterflies, *Proceedings of the National Academy of Sciences,* 108(49), 19666–19671.

Hiramatsu, C. ve diğ. (2017) Experimental evidence that primate trichromacy is well suited for detecting primate social colour signals, *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences,* 284(1856), 20162458.

Hiryu, S. ve diğ. (2005) Doppler-shift compensation in the Taiwanese leaf-nosed bat (*Hipposideros terasensis*) recorded with a telemetry microphone system during flight, *Journal of the Acoustical Society of America,* 118(6), 3927–3933.

Hochner, B. (2012) An embodied view of octopus neurobiology, *Current Biology,* 22(20), R887–R892.

Hochner, B. (2013) How nervous systems evolve in relation to their embodiment: What we can learn from octopuses and other molluscs, *Brain, Behavior and Evolution,* 82(1), 19–30.

Hochstoeger, T. ve diğ. (2020) The biophysical, molecular, and anatomical landscape of pigeon CRY4: A candidate light-based quantal magnetosensor, *Science Advances,* 6(33), eabb9110.

Hofer, B. (1908) Studien über die Hautsinnesorgane der Fische. I. Die Funktion der Seitenorgane bei den Fischen, *Berichte aus der Kgl. Bayerischen Biologischen Versuchsstation in München,* 1, 115–164.

Hoffstaetter, L. J., Bagriantsev, S. N. ve Gracheva, E. O. (2018) TRPs ve diğ.: A molecular toolkit for thermosensory adaptations, *Pflügers Archiv—European Journal of Physiology,* 470(5), 745–759.

Holderied, M. W. ve von Helversen, O. (2003) Echolocation range and wingbeat period match in aerial-hawking bats, *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences,* 270(1530), 2293–2299.

Holland, R. A. ve diğ. (2006) Navigation: Bat orientation using Earth's magnetic field, *Nature,* 444(7120), 702.

Holy, T. E. ve Guo, Z. (2005) Ultrasonic songs of male mice, *PLOS Biology,* 3(12), e386.

Hopkins, C. ve Bass, A. (1981) Temporal coding of species recognition signals in an electric fish, *Science,* 212(4490), 85–87.

Hopkins, C. D. (1981) On the diversity of electric signals in a community of mormyrid electric fish in West Africa, *American Zoologist,* 21(1), 211–222.

Hopkins, C. D. (2005) Passive electrolocation and the sensory guidance of oriented behavior, *Electroreception* içinde, Bullock, T. H. ve diğ. (haz.), s. 264–289. New York: Springer.

Hopkins, C. D. (2009) Electrical perception and communication, *Encyclopedia of neuroscience* içinde, Squire, L. R. (haz.), s. 813–831. Amsterdam: Elsevier.

Hore, P. J. ve Mouritsen, H. (2016) The radical-pair mechanism of magnetoreception, *Annual Review of Biophysics,* 45(1), 299–344.

Horowitz, A. (2010) *Inside of a dog: What dogs see, smell, and know.* Londra: Simon & Schuster UK.

Horowitz, A. (2016) *Being a dog: Following the dog into a world of smell.* New York: Scribner.

Horowitz, A. ve Franks, B. (2020) What smells? Gauging attention to olfaction in canine cognition research, *Animal Cognition,* 23(1), 11–18.

Horváth, G. ve diğ. (2009) Polarized light pollution: A new kind of ecological photopollution, *Frontiers in Ecology and the Environment,* 7(6), 317–325.

Horwitz, J. (2015) *War of the whales: A true story.* New York: Simon & Schuster.

Hughes, A. (1977) The topography of vision in mammals of contrasting life style: Comparative optics and retinal organisation, *The visual system in vertebrates* içinde, Crescitelli, F. (haz.), s. 613–756. New York: Springer.

Hughes, H. C. (2001) *Sensory exotica: A world beyond human experience.* Cambridge, MA: MIT Press.

Hulgard, K. ve diğ. (2016) Big brown bats (*Eptesicus fuscus*) emit intense search calls and fly in stereotyped flight paths as they forage in the wild, *Journal of Experimental Biology,* 219(3), 334–340.

Hunt, S. ve diğ. (1998) Blue tits are ultraviolet tits, *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences,* 265(1395), 451–455.

Hurst, J. ve diğ. (haz.), (2008) *Chemical signals in vertebrates 11.* New York: Springer.

Ibrahim, N. ve diğ. (2014) Semiaquatic adaptations in a giant predatory dinosaur, *Science,* 345(6204), 1613–1616.

Ikinamo (2011) Simroid dental training humanoid robot communicates with trainee dentists #DigInfo. [Video] Erişim adresi: www.youtube.com/watch?v=C47N-HADFQSo.

Inger, R. ve diğ. (2014) Potential biological and ecological effects of flickering artificial light, *PLOS One,* 9(5), e98631.

Inman, M. (2013) Why the mantis shrimp is my new favorite animal, *The Oatmeal.* Erişim adresi: theoatmeal.com/comics/mantis_shrimp.

Irwin, W. P., Horner, A. J. ve Lohmann, K. J. (2004) Magnetic field distortions produced by protective cages around sea turtle nests: Unintended consequences for orientation and navigation?, *Biological Conservation,* 118(1), 117–120.

Ivanov, M. P. (2004) Dolphin's echolocation signals in a complicated acoustic environment, *Acoustical Physics,* 50(4), 469–479.

Jacobs, G. H. (1984) Within-species variations in visual capacity among squirrel monkeys (*Saimiri sciureus*): Color vision, *Vision Research,* 24(10), 1267–1277.

Jacobs, G. H. ve Neitz, J. (1987) Inheritance of color vision in a New World monkey (*Saimiri sciureus*), *Proceedings of the National Academy of Sciences,* 84(8), 2545–2549.

Jacobs, G. H., Neitz, J. ve Deegan, J. F. (1991) Retinal receptors in rodents maximally sensitive to ultraviolet light, *Nature,* 353(6345), 655–656.

Jacobs, L. F. (2012) From chemotaxis to the cognitive map: The function of olfaction, *Proceedings of the National Academy of Sciences,* 109 (Ek 1), 10693–10700.

Jakob, E. M. ve diğ. (2018) Lateral eyes direct principal eyes as jumping spiders track objects, *Current Biology,* 28(18), R1092–R1093.

Jakobsen, L., Ratcliffe, J. M. ve Surlykke, A. (2013) Convergent acoustic field of view in echolocating bats, *Nature,* 493(7430), 93–96.

Japyassú, H. F. ve Laland, K. N. (2017) Extended spider cognition, *Animal Cognition,* 20(3), 375–395.

Jechow, A. ve Hölker, F. (2020) Evidence that reduced air and road traffic decreased artificial night-time skyglow during COVID-19 lockdown in Berlin, Germany, *Remote Sensing,* 12(20), 3412.

Jiang, P. ve diğ. (2012) Major taste loss in carnivorous mammals, *Proceedings of the National Academy of Sciences,* 109(13), 4956–4961.

Johnsen, S. (2012) *The optics of life: A biologist's guide to light in nature.* Princeton, NJ: Princeton University Press.

Johnsen, S. (2014) Hide and seek in the open sea: Pelagic camouflage and visual countermea- sures, *Annual Review of Marine Science,* 6(1), 369–392.

Johnsen, S. (2017) Open questions: We don't really know anything, do we? Open questions in sensory biology, *BMC Biology,* 15(1), 43.

Johnsen, S. ve Lohmann, K. J. (2005) The physics and neurobiology of magnetoreception, *Nature Reviews Neuroscience,* 6(9), 703–712.

Johnsen, S., Lohmann, K. J. ve Warrant, E. J. (2020) Animal navigation: A noisy magnetic sense?, *Journal of Experimental Biology,* 223(18), jeb164921.

Johnsen, S. ve Widder, E. (2019) Mission logs: June 20, Here be monsters: We filmed a giant squid in America's backyard, *NOAA Ocean Exploration.* Erişim adresi: oceanexplorer.noaa.gov/explorations/19biolum/logs/jun20/jun20.html.

Johnson, M. ve diğ. (2004) Beaked whales echolocate on prey, *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences,* 271(Ek 6), S383–S386.

Johnson, M., Aguilar de Soto, N. ve Madsen, P. (2009) Studying the behaviour and sensory ecology of marine mammals using acoustic recording tags: A review, *Marine Ecology Progress Series,* 395, 55–73.

Johnson, R. N. ve diğ. (2018) Adaptation and conservation insights from the koala genome, *Nature Genetics,* 50(8), 1102–1111.

Jones, G. ve Teeling, E. (2006) The evolution of echolocation in bats, *Trends in Ecology & Evolution,* 21(3), 149–156.

Jordan, G. ve diğ. (2010) The dimensionality of color vision in carriers of anomalous trichromacy, *Journal of Vision,* 10(8), 12.

Jordan, G. ve Mollon, J. (2019) Tetrachromacy: The mysterious case of extraordinary color vision, *Current Opinion in Behavioral Sciences,* 30, 130–134.

Jordt, S.-E. ve Julius, D. (2002) Molecular basis for species-specific sensitivity to "hot" chili peppers, *Cell,* 108(3), 421–430.

Josberger, E. E. ve diğ. (2016) Proton conductivity in ampullae of Lorenzini jelly, *Science Advances,* 2(5), e1600112.

Jung, J. ve diğ. (2019) How do red-eyed treefrog embryos sense motion in predator attacks? Assessing the role of vestibular mechanoreception, *Journal of Experimental Biology,* 222(21), jeb206052.

Jung, K., Kalko, E. K. V. ve von Helversen, O. (2007) Echolocation calls in Central American emballonurid bats: Signal design and call frequency alternation, *Journal of Zoology,* 272(2), 125–137.

Kajiura, S. M. (2001) Head morphology and electrosensory pore distribution of carcharhinid and sphyrnid sharks, *Environmental Biology of Fishes,* 61(2), 125–133.

Kajiura, S. M. (2003) Electroreception in neonatal bonnethead sharks, *Sphyrna tiburo, Marine Biology,* 143(3), 603–611.

Kajiura, S. M. ve Holland, K. N. (2002) Electroreception in juvenile scalloped hammerhead and sandbar sharks, *Journal of Experimental Biology,* 205(23), 3609–3621.

Kalberer, N. M., Reisenman, C. E. ve Hildebrand, J. G. (2010) Male moths bearing transplanted female antennae express characteristically female behaviour and central neural activity, *Journal of Experimental Biology,* 213(8), 1272–1280.

Kalka, M. B., Smith, A. R. ve Kalko, E. K. V. (2008) Bats limit arthropods and herbivory in a tropical forest, *Science,* 320(5872), 71.

Kalmijn, A. J. (1971) The electric sense of sharks and rays, *Journal of Experimental Biology,* 55(2), 371–383.

Kalmijn, A. J. (1974) The detection of electric fields from inanimate and animate sources other than electric organs, in Fessard, A. (haz.), *Electroreceptors and other specialized receptors in lower vertebrates,* s. 147–200. Berlin: Springer.

Kalmijn, A. J. (1982) Electric and magnetic field detection in elasmobranch fishes, *Science,* 218(4575), 916–918.

Kaminski, J. ve diğ. (2019) Evolution of facial muscle anatomy in dogs, *Proceedings of the National Academy of Sciences,* 116(29), 14677–14681.

Kane, S. A., Van Beveren, D. ve Dakin, R. (2018) Biomechanics of the peafowl's crest reveals frequencies tuned to social displays, *PLOS One,* 13(11), e0207247.

Kant, I. (2007) *Anthropology, history, and education.* Cambridge: Cambridge University Press.

Kapoor, M. (2020) The only catfish native to the western U.S. is running out of water, *High Country News.* Erişim adresi: www.hcn.org/issues/52.7/fish-the-only-catfish-native-to-the-western-u-s-is-running-out-of-water.

Kardong, K. V. ve Berkhoudt, H. (1999) Rattlesnake hunting behavior: Correlations between plasticity of predatory performance and neuroanatomy, *Brain, Behavior and Evolution,* 53(1), 20–28.

Kardong, K. V. ve Mackessy, S. P. (1991) The strike behavior of a congenitally blind rattle-snake, *Journal of Herpetology,* 25(2), 208–211.

Kasumyan, A. O. (2019) The taste system in fishes and the effects of environmental variables, *Journal of Fish Biology,* 95(1), 155–178.

Katz, H. K. ve diğ. (2015) Eye movements in chameleons are not truly independent—Evidence from simultaneous monocular tracking of two targets, *Journal of Experimental Biology,* 218(13), 2097–2105.

Kavaliers, M. (1988) Evolutionary and comparative aspects of nociception, *Brain Research Bulletin,* 21(6), 923–931.

Kawahara, A. Y. ve diğ. (2019) Phylogenomics reveals the evolutionary timing and pattern of butterflies and moths, *Proceedings of the National Academy of Sciences,* 116(45), 22657–22663.

Kelber, A., Balkenius, A. ve Warrant, E. J. (2002) Scotopic colour vision in nocturnal hawk-moths, *Nature,* 419(6910), 922–925.

Kelber, A., Vorobyev, M. ve Osorio, D. (2003) Animal colour vision—Behavioural tests and physiological concepts, *Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society,* 78(1), 81–118.

Keller, A. ve diğ. (2007) Genetic variation in a human odorant receptor alters odour perception, *Nature,* 449(7161), 468–472.

Keller, A. ve Vosshall, L. B. (2004a) A psychophysical test of the vibration theory of olfaction, *Nature Neuroscience,* 7(4), 337–338.

Keller, A. ve Vosshall, L. B. (2004b) Human olfactory psychophysics, *Current Biology,* 14(20), R875–R878.

Kempster, R. M., Hart, N. S. ve Collin, S. P. (2013) Survival of the stillest: Predator avoidance in shark embryos, *PLOS One,* 8(1), e52551.

Ketten, D. R. (1997) Structure and function in whale ears, *Bioacoustics,* 8(1–2), 103–135.

Key, B. (2016) Why fish do not feel pain, *Animal Sentience,* 1(3).

Key, F. M. ve diğ. (2018) Human local adaptation of the TRPM8 cold receptor along a latitudinal cline, *PLOS Genetics,* 14(5), e1007298.

Kick, S. ve Simmons, J. (1984) Automatic gain control in the bat's sonar receiver and the neuroethology of echolocation, *Journal of Neuroscience,* 4(11), 2725–2737.

Kimchi, T., Etienne, A. S. ve Terkel, J. (2004) A subterranean mammal uses the magnetic compass for path integration, *Proceedings of the National Academy of Sciences,* 101(4), 1105–1109.

King, J. E., Becker, R. F. ve Markee, J. E. (1964) Studies on olfactory discrimination in dogs: (3) Ability to detect human odour trace, *Animal Behaviour,* 12(2), 311–315.

Kingston, A. C. N. ve diğ. (2015) Visual phototransduction components in cephalopod chromatophores suggest dermal photoreception, *Journal of Experimental Biology,* 218(10), 1596–1602.

Kirschfeld, K. (1976) The resolution of lens and compound eyes, in Zettler, F. ve Weiler, R. (haz.), *Neural principles in vision,* s. 354–370. Berlin: Springer.

Kirschvink, J. ve diğ. (1997) Measurement of the threshold sensitivity of honeybees to weak, extremely low-frequency magnetic fields, *Journal of Experimental Biology,* 200(Pt 9), 1363–1368.

Kish, D. (1995) Echolocation: How humans can "see" without sight. Yayımlanmamış yüksek lisans tezi, California State University.

Kish, D. (2015) How I use sonar to navigate the world. TED Konuşması. Erişim adresi: www.ted.com/talks/daniel_kish_how_i_use_sonar_to_navigate_the_world.

Klärner, D. ve Barth, F. G. (1982) Vibratory signals and prey capture in orb-weaving spiders (*Zygiella x-notata, Nephila clavipes;* Araneidae), *Journal of Comparative Physiology,* 148(4), 445– 455.

Klopsch, C., Kuhlmann, H. C. ve Barth, F. G. (2012) Airflow elicits a spider's jump towards airborne prey. I. Airflow around a flying blowfly, *Journal of the Royal Society Interface,* 9(75), 2591–2602.

Klopsch, C., Kuhlmann, H. C. ve Barth, F. G. (2013) Airflow elicits a spider's jump towards airborne prey. II. Flow characteristics guiding behaviour, *Journal of the Royal Society Interface,* 10(82), 20120820.

Knop, E. ve diğ. (2017) Artificial light at night as a new threat to pollination, *Nature,* 548(7666), 206–209.

Knudsen, E. I., Blasdel, G. G. ve Konishi, M. (1979) Sound localization by the barn owl (*Tyto alba*) measured with the search coil technique, *Journal of Comparative Physiology A,* 133(1), 1–11.

Kober, R. ve Schnitzler, H. (1990) Information in sonar echoes of fluttering insects available for echolocating bats, *Journal of the Acoustical Society of America,* 87(2), 882–896.

Kojima, S. (1990) Comparison of auditory functions in the chimpanzee and human, *Folia Primatologica,* 55(2), 62–72.

Kolbert, E. (2014) *The sixth extinction: An unnatural history.* New York: Henry Holt; Türkçesi: *Altıncı Yok Oluş*, çev. Nalan Tümay, İstanbul: Okuyan Us Yayınları, 2019.

Konishi, M. (1969) Time resolution by single auditory neurones in birds, *Nature,* 222(5193), 566–567.

Konishi, M. (1973) Locatable and nonlocatable acoustic signals for barn owls, *The American Naturalist,* 107(958), 775–785.

Konishi, M. (2012) How the owl tracks its prey, *American Scientist,* 100(6), 494.

Koselj, K., Schnitzler, H.-U. ve Siemers, B. M. (2011) Horseshoe bats make adaptive prey-selection decisions, informed by echo cues, *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences,* 278(1721), 3034–3041.

Koshitaka, H. ve diğ. (2008) Tetrachromacy in a butterfly that has eight varieties of spectral receptors, *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences,* 275(1637), 947–954.

Kothari, N. B. ve diğ. (2014) Timing matters: Sonar call groups facilitate target localization in bats, *Frontiers in Physiology,* 5, 168.

Krestel, D. ve diğ. (1984) Behavioral determination of olfactory thresholds to amyl acetate in dogs, *Neuroscience and Biobehavioral Reviews,* 8(2), 169–174.

Kröger, R. H. H. ve Goiricelaya, A. B. (2017) Rhinarium temperature dynamics in domestic dogs, *Journal of Thermal Biology,* 70, 15–19.

Krumm, B. ve diğ. (2017) Barn owls have ageless ears, *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences,* 284(1863), 20171584.

Kuhn, R. A. ve diğ. (2010) Hair density in the Eurasian otter *Lutra lutra* and the sea otter *Enhydra lutris, Acta Theriologica,* 55(3), 211–222.

Kuna, V. M. and Nábělek, J. L. (2021) Seismic crustal imaging using fin whale songs, *Science,* 371(6530), 731–735.

Kunc, H. ve diğ. (2014) Anthropogenic noise affects behavior across sensory modalities, *The American Naturalist,* 184 (4), E93–E100.

Kürten, L. and Schmidt, U. (1982) Thermoperception in the common vampire bat (*Desmodus rotundus*), *Journal of Comparative Physiology A,* 146(2), 223–228.

Kwon, D. (2019) Watcher of whales: A profile of Roger Payne. *The Scientist.* Erişim adresi:www.the-scientist.com/profile/watcher-of-whales--a-profile-of-roger-payne-66610.

Kyba, C. C. M. ve diğ. (2017) Artificially lit surface of Earth at night increasing in radiance and extent, *Science Advances,* 3(11), e1701528.

Land, M. F. (1966) A multilayer interference reflector in the eye of the scallop, *Pecten maximus, Journal of Experimental Biology,* 45(3), 433–447.

Land, M. F. (1969a) Movements of the retinae of jumping spiders (Salticidae: Dendryphantinae) in response to visual stimuli, *Journal of Experimental Biology,* 51(2), 471–493.

Land, M. F. (1969b) Structure of the retinae of the principal eyes of jumping spiders (Salticidae: Dendryphantinae) in relation to visual optics, *Journal of Experimental Biology,* 51(2), 443–470.

Land, M. F. (2003) The spatial resolution of the pinhole eyes of giant clams (*Tridacna maxima*), *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences,* 270(1511), 185–188.

Land, M. F. (2018) *Eyes to see: The astonishing variety of vision in nature.* Oxford: Oxford University Press.

Land, M. F. ve diğ. (1990) The eye-movements of the mantis shrimp *Odontodactylus scyllarus* (Crustacea: Stomatopoda), *Journal of Comparative Physiology A,* 167(2), 155–166.

Landler, L. ve diğ. (2018) Comment on "Magnetosensitive neurons mediate geomagnetic orientation in *Caenorhabditis elegans,*" *eLife,* 7, e30187.

Landolfa, M. A. ve Barth, F. G. (1996) Vibrations in the orb web of the spider *Nephila clavipes*: Cues for discrimination and orientation, *Journal of Comparative Physiology A,* 179(4), 493– 508.

Lane, K. A., Lucas, K. M. ve Yack, J. E. (2008) Hearing in a diurnal, mute butterfly, *Morpho peleides* (Papilionoidea, Nymphalidae), *Journal of Comparative Neurology,* 508(5), 677–686.

Laska, M. (2017) Human and animal olfactory capabilities compared, *Springer handbook of odor* içinde, Buettner, A. (haz.), s. 81–82. New York: Springer.

Laughlin, S. B. ve Weckström, M. (1993) Fast and slow photoreceptors—A comparative study of the functional diversity of coding and conductances in the Diptera, *Journal of Comparative Physiology A,* 172(5), 593–609.

Laursen, W. J. ve diğ. (2016) Low-cost functional plasticity of TRPV1 supports heat tolerance in squirrels and camels, *Proceedings of the National Academy of Sciences,* 113(40), 11342–11347.

LaVinka, P. C. ve Park, T. J. (2012) Blunted behavioral and C Fos responses to acidic fumes in the African naked mole-rat, *PLOS One,* 7(9), e45060.

Lavoué, S. ve diğ. (2012) Comparable ages for the independent origins of electrogenesis in African and South American weakly electric fishes, *PLOS One,* 7(5), e36287.

Lawson, S. L. ve diğ. (2018) Relative salience of syllable structure and syllable order in zebra finch song, *Animal Cognition,* 21(4), 467–480.

Lazzari, C. R. (2009) Orientation towards hosts in haematophagous insects, *Advances in insect physiology* içinde, Simpson, S. ve Casas, J. (haz.), cilt 37, s. 1–58. Amsterdam: Elsevier.

Lecocq, T. ve diğ. (2020) Global quieting of high-frequency seismic noise due to COVID-19 pandemic lockdown measures, *Science,* 369(6509), 1338–1343.

Lee-Johnson, C. P. ve Carnegie, D. A. (2010) Mobile robot navigation modulated by artificial emotions, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics),* 40(2), 469–480.

Legendre, F., Marting, P. R. ve Cocroft, R. B. (2012) Competitive masking of vibrational signals during mate searching in a treehopper, *Animal Behaviour,* 83(2), 361–368.

Leitch, D. B. ve Catania, K. C. (2012) Structure, innervation and response properties of integumentary sensory organs in crocodilians, *Journal of Experimental Biology,* 215(23), 4217– 4230.

Lenoir, A. ve diğ. (2001) Chemical ecology and social parasitism in ants, *Annual Review of Entomology,* 46(1), 573–599.

Leonard, M. L. ve Horn, A. G. (2008) Does ambient noise affect growth and begging call structure in nestling birds?, *Behavioral Ecology,* 19(3), 502–507.

Leonhardt, S. D. ve diğ. (2016) Ecology and evolution of communication in social insects, *Cell,* 164(6), 1277–1287.

Levy, G. ve Hochner, B. (2017) Embodied organization of *Octopus vulgaris* morphology, vision, and locomotion, *Frontiers in Physiology,* 8, 164.

Lewin, G., Lu, Y. ve Park, T. (2004) A plethora of painful molecules, *Current Opinion in Neurobiology,* 14(4), 443–449.

Lewis, E. R. ve diğ. (2006) Preliminary evidence for the use of microseismic cues for navigation by the Namib golden mole, *Journal of the Acoustical Society of America,* 119(2), 1260–1268.

Lewis, J. (2014) Active electroreception: Signals, sensing, and behavior, *The physiology of fishes* içinde, Evans, D. H., Claiborne, J. B. ve Currie, S. (haz.), 4. basım, 373–388. Boca Raton, FL: CRC Press.

Li, F. (2013) Taste perception: From the tongue to the testis, *Molecular Human Reproduction,* 19(6), 349–360.

Li, L. ve diğ. (2015) Multifunctionality of chiton biomineralized armor with an integrated visual system, *Science,* 350(6263), 952–956.

Lind, O. ve diğ. (2013) Ultraviolet sensitivity and colour vision in raptor foraging, *Journal of Experimental Biology,* 216(Pt 10), 1819–1826.

Linsley, E. G. (1943) Attraction of *Melanophila* beetles by fire and smoke, *Journal of Economic Entomology,* 36(2), 341–342.

Linsley, E. G. ve Hurd, P. D. (1957) *Melanophila* beetles at cement plants in Southern California (Coleoptera, Buprestidae), *Coleopterists Bulletin,* 11(1/2), 9–11.

Lissmann, H. W. (1951) Continuous electrical signals from the tail of a fish, *Gymnarchus niloticus* Cuv., *Nature,* 167(4240), 201–202.

Lissmann, H. W. (1958) On the function and evolution of electric organs in fish, *Journal of Experimental Biology,* 35(1), 156–191.

Lissmann, H. W. ve Machin, K. E. (1958) The mechanism of object location in *Gymnarchus niloticus* and similar fish, *Journal of Experimental Biology,* 35(2), 451–486.

Liu, M. Z. ve Vosshall, L. B. (2019) General visual and contingent thermal cues interact to elicit attraction in female *Aedes aegypti* mosquitoes, *Current Biology,* 29(13), 2250–2257.e4.

Liu, Z. ve diğ.(2014) Repeated functional convergent effects of NaV1.7 on acid insensitivity in hibernating mammals, *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences,* 281(1776), 20132950.

Lloyd, E. ve diğ. (2018) Evolutionary shift towards lateral line dependent prey capture behavior in the blind Mexican cavefish, *Developmental Biology,* 441(2), 328–337.

Lohmann, K. J. (1991) Magnetic orientation by hatchling loggerhead sea turtles (*Caretta Caretta*), *Journal of Experimental Biology,* 155, 37–49.

Lohmann, K. ve diğ. (1995) Magnetic orientation of spiny lobsters in the ocean: Experiments with undersea coil systems, *Journal of Experimental Biology,* 198(Pt 10), 2041–2048.

Lohmann, K. J. ve diğ. (2001) Regional magnetic fields as navigational markers for sea turtles, *Science,* 294(5541), 364–366.

Lohmann, K. J. ve diğ. (2004) Geomagnetic map used in sea-turtle navigation, *Nature,* 428(6986), 909–910.

Lohmann, K. ve Lohmann, C. (1994) Detection of magnetic inclination angle by sea turtles: A possible mechanism for determining latitude, *Journal of Experimental Biology,* 194(1), 23–32.

Lohmann, K. J. ve Lohmann, C. M. F. (1996) Detection of magnetic field intensity by sea turtles, *Nature,* 380(6569), 59–61.

Lohmann, K. J. ve Lohmann, C. M. F. (2019) There and back again: Natal homing by magnetic navigation in sea turtles and salmon, *Journal of Experimental Biology,* 222(Suppl. 1), jeb184077.

Lohmann, K. J., Putman, N. F. ve Lohmann, C. M. F. (2008) Geomagnetic imprinting: A unifying hypothesis of long-distance natal homing in salmon and sea turtles, *Proceedings of the National Academy of Sciences,* 105(49), 19096–19101.

Longcore, T. (2018) Hazard or hope? LEDs and wildlife, *LED Professional Review,* 70, 52–57.

Longcore, T. ve diğ. (2012) An estimate of avian mortality at communication towers in the United States and Canada, *PLOS One,* 7(4), e34025.

Longcore, T. ve Rich, C. (2016) *Artificial night lighting and protected lands: Ecological effects and management approaches.* Natural Resource Report 2017/1493.

Lu, P. ve diğ. (2017) Extraoral bitter taste receptors in health and disease, *Journal of General Physiology,* 149(2), 181–197.

Lubbock, J. (1881) Observations on ants, bees, and wasps.—Part VIII, *Journal of the Linnean Society of London, Zoology,* 15(87), 362–387.

Lucas, J. ve diğ. (2002) A comparative study of avian auditory brainstem responses: Correlations with phylogeny and vocal complexity, and seasonal effects, *Journal of Comparative Physiology A,* 188(11–12), 981–992.

Lucas, J. R. ve diğ. (2007) Seasonal variation in avian auditory evoked responses to tones: A comparative analysis of Carolina chickadees, tufted titmice, and white-breasted nut- hatches, *Journal of Comparative Physiology A,* 193(2), 201–215.

Ludeman, D. A. ve diğ. (2014) Evolutionary origins of sensation in metazoans: Functional evidence for a new sensory organ in sponges, *BMC Evolutionary Biology,* 14(1), 3.

Maan, M. E. ve Cummings, M. E. (2012) Poison frog colors are honest signals of toxicity, particularly for bird predators, *The American Naturalist,* 179(1), E1–E14.

Macpherson, F. (2011) Individuating the senses, *The senses: Classic and contemporary philosophical perspectives* içinde, Macpherson, F. (haz.), s. 3–43. Oxford: Oxford University Press.

Madhav, M. S. ve diğ. (2018) High-resolution behavioral mapping of electric fishes in Amazonian habitats, *Scientific Reports,* 8(1), 5830.

Madsen, P. T. ve diğ. (2002) Sperm whale sound production studied with ultrasound time/depth-recording tags, *Journal of Experimental Biology,* 205(Pt 13), 1899–1906.

Madsen, P. T. ve diğ. (2013) Echolocation in Blainville's beaked whales (*Mesoplodon densirostris*), *Journal of Comparative Physiology A,* 199(6), 451–469.

Madsen, P. T. ve Surlykke, A. (2014) Echolocation in air and water, *Biosonar* içinde, Surlykke, A. ve diğ. (haz.), s. 257–304. New York: Springer.

Majid, A. (2015) Cultural factors shape olfactory language, *Trends in Cognitive Sciences,* 19(11), 629–630.

Majid, A. ve diğ. (2017) What makes a better smeller?, *Perception,* 46(3–4), 406–430.

Majid, A. ve Kruspe, N. (2018) Hunter-gatherer olfaction is special, *Current Biology,* 28(3), 409–413.e2.

Malakoff, D. (2010) A push for quieter ships, *Science,* 328(5985), 1502–1503.

Mancuso, K. ve diğ. (2009) Gene therapy for red-green colour blindness in adult primates, *Nature,* 461(7625), 784–787.

Marder, E.ü ve Bucher, D. (2007) Understanding circuit dynamics using the stomatogastric nervous system of lobsters and crabs, *Annual Review of Physiology,* 69(1), 291–316.

Marshall, C. D. ve diğ. (1998) Prehensile use of perioral bristles during feeding and associated behaviors of the Florida manatee (*Trichechus manatus latirostris*), *Marine Mammal Science,* 14(2), 274–289.

Marshall, C. D., Clark, L. A. ve Reep, R. L. (1998) The muscular hydrostat of the Florida manatee (*Trichechus manatus latirostris*): A functional morphological model of perioral bristle use, *Marine Mammal Science,* 14(2), 290–303.

Marshall, J. ve Arikawa, K. (2014) Unconventional colour vision, *Current Biology,* 24(24), R1150–R1154.

Marshall, J., Carleton, K. L. ve Cronin, T. (2015) Colour vision in marine organisms, *Current Opinions in Neurobiology,* 34, 86–94.

Marshall, J. ve Oberwinkler, J. (1999) The colourful world of the mantis shrimp, *Nature,* 401(6756), 873–874.

Marshall, N. J. (1988) A unique colour and polarization vision system in mantis shrimps, *Nature,* 333(6173), 557–560.

Marshall, N. J. ve diğ. (2019a) Colours and colour vision in reef fishes: Past, present and future research directions, *Journal of Fish Biology,* 95(1), 5–38.

Marshall, N. J. ve diğ. (2019b) Polarisation signals: A new currency for communication, *Journal of Experimental Biology,* 222(3), jeb134213.

Marshall, N. J., Land, M. F. ve Cronin, T. W. (2014) Shrimps that pay attention: Saccadic eye movements in stomatopod crustaceans, *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Bio- logical Sciences,* 369(1636), 20130042.

Martin, G. R. (2012) Through birds' eyes: Insights into avian sensory ecology, *Journal of Orni- thology,* 153(Ek 1), 23–48.

Martin, G. R., Portugal, S. J. ve Murn, C. P. (2012) Visual fields, foraging and collision vulnerability in *Gyps* vultures, *Ibis,* 154(3), 626–631.

Martinez, V. ve diğ. (2020) Antlions are sensitive to subnanometer amplitude vibrations carried by sand substrates, *Journal of Comparative Physiology A,* 206(5), 783–791.

Masland, R. H. (2017) Vision: Two speeds in the retina, *Current Biology,* 27(8), R303–R305.

Mason, A. C., Oshinsky, M. L. ve Hoy, R. R. (2001) Hyperacute directional hearing in a microscale auditory system, *Nature,* 410(6829), 686–690.

Mason, M. J. (2003) Bone conduction and seismic sensitivity in golden moles (Chrysochloridae), *Journal of Zoology,* 260(4), 405–413.

Mason, M. J. ve Narins, P. M. (2002) Seismic sensitivity in the desert golden mole (*Eremitalpa granti*): A review, *Journal of Comparative Psychology,* 116(2), 158–163.

Mass, A. M. ve Supin, A. Y. (1995) Ganglion cell topography of the retina in the bottlenosed dolphin, *Tursiops truncatus, Brain, Behavior and Evolution,* 45(5), 257–265.

Mass, A. M. ve Supin, A. Y. (2007) Adaptive features of aquatic mammals' eye, *The Anatomical Record,* 290(6), 701–715.

Masters, W. M. (1984) Vibrations in the orbwebs of *Nuctenea sclopetaria* (Araneidae). I. Transmission through the web, *Behavioral Ecology and Sociobiology,* 15(3), 207–215.

Matos-Cruz, V. ve diğ. (2017) Molecular prerequisites for diminished cold sensitivity in ground squirrels and hamsters, *Cell Reports,* 21(12), 3329–3337.

Maximov, V. V. (2000) Environmental factors which may have led to the appearance of colour vision, *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences,* 355(1401), 1239–1242.

McArthur, C. ve diğ. (2019) Plant volatiles are a salient cue for foraging mammals: Elephants target preferred plants despite background plant odour, *Animal Behaviour,* 155, 199–216.

McBride, C. S. (2016) Genes and odors underlying the recent evolution of mosquito preference for humans, *Current Biology,* 26(1), R41–R46.

McBride, C. S. ve diğ. (2014) Evolution of mosquito preference for humans linked to an odorant receptor, *Nature,* 515(7526), 222–227.

McCulloch, K. J., Osorio, D. ve Briscoe, A. D. (2016) Sexual dimorphism in the compound eye of *Heliconius erato*: A nymphalid butterfly with at least five spectral classes of photoreceptor, *Journal of Experimental Biology,* 219(15), 2377–2387.

McGann, J. P. (2017) Poor human olfaction is a 19th-century myth, *Science,* 356(6338), eaam7263.

McGregor, P. K. ve Westby, G. M. (1992) Discrimination of individually characteristic electric organ discharges by a weakly electric fish, *Animal Behaviour,* 43(6), 977–986.

McKemy, D. D. (2007) Temperature sensing across species, *Pflügers Archiv—European Journal of Physiology,* 454(5), 777–791.

McKenzie, S. K. ve Kronauer, D. J. C. (2018) The genomic architecture and molecular evolution of ant odorant receptors, *Genome Research,* 28(11), 1757–1765.

McMeniman, C. J. ve diğ. (2014) Multimodal integration of carbon dioxide and other sensory cues drives mosquito attraction to humans, *Cell,* 156(5), 1060–1071.

Meister, M. (2016) Physical limits to magnetogenetics, *eLife,* 5, e17210.

Melin, A. D. ve diğ. (2007) Effects of colour vision phenotype on insect capture by a free-ranging population of white-faced capuchins, *Cebus capucinus, Animal Behaviour,* 73(1), 205–214.

Melin, A. D. ve diğ. (2016) Zebra stripes through the eyes of their predators, zebras, and humans, *PLOS One,* 11(1), e0145679.

Melin, A. D. ve diğ. (2017) Trichromacy increases fruit intake rates of wild capuchins (*Cebus capucinus imitator*), *Proceedings of the National Academy of Sciences,* 114(39), 10402–10407.

Melo, N. ve diğ. (2021) The irritant receptor TRPA1 mediates the mosquito repellent effect of catnip, *Current Biology,* 31(9), 1988–1994.e5.

Mencinger-Vračko, B. ve Devetak, D. (2008) Orientation of the pit-building antlion larva *Euroleon* (Neuroptera, Myrmeleontidae) to the direction of substrate vibrations caused by prey, *Zoology,* 111(1), 2–8.

Menda, G. ve diğ. (2019) The long and short of hearing in the mosquito *Aedes aegypti, Current Biology,* 29(4), 709–714.e4.

Merkel, F. W. ve Fromme, H. G. (1958) Untersuchungen über das Orientierungsvermögen nächtlich ziehender Rotkehlchen, *Naturwissenschaften,* 45(2), 499–500.

Merker, B. (2005) The liabilities of mobility: A selection pressure for the transition to con- sciousness in animal evolution, *Consciousness and Cognition,* 14(1), 89–114.

Mettam, J. J. ve diğ. (2011) The efficacy of three types of analgesic drugs in reducing pain in the rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss, Applied Animal Behaviour Science,* 133(3), 265–274.

Meyer-Rochow, V. B. (1978) The eyes of mesopelagic crustaceans. II. *Streetsia challengeri* (amphipoda), *Cell and Tissue Research,* 186(2), 337–349.

Mhatre, N., Sivalinghem, S. ve Mason, A. C. (2018) Posture controls mechanical tuning in the black widow spider mechanosensory system, bioRxiv. Available at: biorxiv.org/ lookup/doi/10.1101/484238.

Middendorff, A. T. (1855) *Die Isepiptesen Russlands: Grundlagen zur Erforschung der Zugzeiten und Zugrichtungen der Vögel Russlands.* St. Petersburg: Academie impériale des Sciences.

Miles, R. N., Robert, D. ve Hoy, R. R. (1995) Mechanically coupled ears for directional hearing in the parasitoid fly *Ormia ochracea, Journal of the Acoustical Society of America,* 98(6), 3059–3070.

Miller, A. K., Hensman, M. C. ve diğ. (2015) African elephants (*Loxodonta africana*) can detect TNT using olfaction: Implications for biosensor application, *Applied Animal Behaviour Science,* 171, 177–183.

Miller, A. K., Maritz, B. ve diğ. (2015) An ambusher's arsenal: Chemical crypsis in the puff adder (*Bitis arietans*), *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences,* 282(1821), 20152182.

Miller, P. J. O., Kvadsheim, P. H. ve diğ. (2015) First indications that northern bottlenose whales are sensitive to behavioural disturbance from anthropogenic noise, *Royal Society Open Science,* 2(6), 140484.

Millsopp, S. ve Laming, P. (2008) Trade-offs between feeding and shock avoidance in gold-fish (*Carassius auratus*), *Applied Animal Behaviour Science,* 113(1), 247–254.

Mitchinson, B. ve diğ. (2011) Active vibrissal sensing in rodents and marsupials, *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences,* 366(1581), 3037–3048.

Mitkus, M. ve diğ. (2018) Raptor vision, in Sherman, S. M. (ed), *Oxford research encyclopedia of neuroscience.* Oxford: Oxford University Press.

Mitra, O. ve diğ. (2009) Grunting for worms: Seismic vibrations cause *Diplocardia* earthworms to emerge from the soil, *Biology Letters,* 5(1), 16–19.

Moayedi, Y., Nakatani, M. ve Lumpkin, E. (2015) Mammalian mechanoreception, *Scholarpedia,* 10(3), 7265.

Modrell, M. S. ve diğ. (2011) Electrosensory ampullary organs are derived from lateral line placodes in bony fishes, *Nature Communications,* 2(1), 496.

Mogdans, J. (2019) Sensory ecology of the fish lateral-line system:

Morphological and physiological adaptations for the perception of hydrodynamic stimuli, *Journal of Fish Biology,* 95(1), 53–72.

Møhl, B. ve diğ. (2003) The monopulsed nature of sperm whale clicks, *Journal of the Acoustical Society of America,* 114(2), 1143–1154.

Moir, H. M., Jackson, J. C. ve Windmill, J. F. C. (2013) Extremely high frequency sensitivity in a "simple" ear, *Biology Letters,* 9(4), 20130241.

Mollon, J. D. (1989) "Tho' she kneel'd in that place where they grew . . .": The uses and origins of primate colour vision, *Journal of Experimental Biology,* 146, 21–38.

Monnin, T. ve diğ. (2002) Pretender punishment induced by chemical signalling in a queenless ant, *Nature,* 419(6902), 61–65.

Montague, M. J., Danek-Gontard, M.,ve Kunc, H. P. (2013) Phenotypic plasticity affects the response of a sexually selected trait to anthropogenic noise, *Behavioral Ecology,* 24(2), 343– 348.

Montealegre-Z, F. ve diğ. (2012) Convergent evolution between insect and mammalian audition, *Science,* 338(6109), 968–971.

Monterey Bay Aquarium (2016) Say hello to Selka!, Monterey Bay Aquarium. Erişim adresi: montereybayaquarium.tumblr.com/post/149326681398/say-hello-to-selka.

Montgomery, J., Bleckmann, H. ve Coombs, S. (2013) Sensory ecology and neuroethology of the lateral line, *The lateral line system* içinde, Coombs, S. ve diğ. (haz.), s. 121–150. New York: Springer.

Montgomery, J. C. ve Saunders, A. J. (1985) Functional morphology of the piper *Hyporhamphus ihi* with reference to the role of the lateral line in feeding, *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences,* 224(1235), 197–208.

Mooney, T. A., Yamato, M. ve Branstetter, B. K. (2012) Hearing in cetaceans: From natural history to experimental biology, *Advances in marine biology,* 63, 197–246.

Moore, B. ve diğ. (2017) Structure and function of regional specializations in the vertebrate retina, *Evolution of nervous systems* içinde, Kaas, J. H. ve Streidter, G. (haz.), s. 351–372. Oxford, Birleşik Krallık: Academic Press.

Moran, D., Softley, R. ve Warrant, E. J. (2015) The energetic cost of vision and the evolution of eyeless Mexican cavefish, *Science Advances,* 1(8), e1500363.

Moreau, C. S. ve diğ. (2006) Phylogeny of the ants: Diversification in the age of angiosperms, *Science,* 312(5770), 101–104.

Morehouse, N. (2020) Spider vision, *Current Biology,* 30(17), R975–R980.

Moreira, L. A. A. ve diğ. (2019) Platyrrhine color signals: New horizons to pursue, *Evolutionary Anthropology: Issues, News, and Reviews,* 28(5), 236–248.

Morley, E. L. ve Robert, D. (2018) Electric fields elicit ballooning in spiders, *Current Biology,* 28(14), 2324–2330.e2.

Mortimer, B. (2017) Biotremology: Do physical constraints limit the propagation of vibrational information?, *Animal Behaviour,* 130, 165–174.

Mortimer, B. ve diğ. (2014) The speed of sound in silk: Linking material performance to biological function, *Advanced Materials,* 26(30), 5179–5183.

Mortimer, B. ve diğ. (2016) Tuning the instrument: Sonic properties in the spider's web, *Journal of the Royal Society Interface,* 13(122), 20160341.

Mortimer, J. A. ve Portier, K. M. (1989) Reproductive homing and internesting behavior of the green turtle (*Chelonia mydas*) at Ascension Island, South Atlantic Ocean, *Copeia,* 1989(4), 962–977.

Moss, C. F. (2018) Auditory mechanisms of echolocation in bats, *Oxford research encyclopedia of neuroscience* içinde, Sherman, S. M. (haz.). Oxford: Oxford University Press.

Moss, C. F. ve diğ. (2006) Active listening for spatial orientation in a complex auditory scene, *PLOS Biology,* 4(4), e79.

Moss, C. F., Chiu, C. ve Surlykke, A. (2011) Adaptive vocal behavior drives perception by echolocation in bats, *Current Opinion in Neurobiology,* 21(4), 645–652.

Moss, C. F. ve Schnitzler, H.-U. (1995) Behavioral studies of auditory information pro-

cessing, *Hearing by bats* içinde, Popper, A. N. ve Fay, R. R. (haz.), s. 87–145. New York: Springer.

Moss, C. F. ve Surlykke, A. (2010) Probing the natural scene by echolocation in bats, *Frontiers in Behavioral Neuroscience,* 4, 33.

Moss, C. J. (2000) *Elephant memories: Thirteen years in the life of an elephant family.* Chicago: University of Chicago Press.

Mouritsen, H. (2018) Long-distance navigation and magnetoreception in migratory animals, *Nature,* 558(7708), 50–59.

Mouritsen, H. ve diğ. (2005) Night-vision brain area in migratory songbirds, *Proceedings of the National Academy of Sciences,* 102(23), 8339–8344.

Mourlam, M. J. ve Orliac, M. J. (2017) Infrasonic and ultrasonic hearing evolved after the emergence of modern whales, *Current Biology,* 27(12), 1776–1781.e9.

Mugan, U. ve MacIver, M. A. (2019) The shift from life in water to life on land advantaged planning in visually-guided behavior, bioRxiv, 585760.

Müller, P. ve Robert, D. (2002) Death comes suddenly to the unprepared: Singing crickets, call fragmentation, and parasitoid flies, *Behavioral Ecology,* 13(5), 598–606.

Murchy, K. A. ve diğ. (2019) Impacts of noise on the behavior and physiology of marine invertebrates: A meta-analysis, *Proceedings of Meetings on Acoustics,* 37(1), 040002.

Murphy, C. T., Reichmuth, C. ve Mann, D. (2015) Vibrissal sensitivity in a harbor seal (*Phoca vitulina*), *Journal of Experimental Biology,* 218(15), 2463–2471.

Murray, R. W. (1960) Electrical sensitivity of the ampullæ of Lorenzini, *Nature,* 187(4741), 957.

Nachtigall, P. E. (2016) Biosonar and sound localization in dolphins, *Oxford research encyclopedia of neuroscience* içinde, Sherman, S. M. (haz.). New York: Oxford University Press.

Nachtigall, P. E. ve Supin, A. Y. (2008) A false killer whale adjusts its hearing when it echo-locates, *Journal of Experimental Biology,* 211(11), 1714–1718.

Nagel, T. (1974) What is it like to be a bat?, *The Philosophical Review,* 83(4), 435–450.

Nakano, R. ve diğ. (2009) Moths are not silent, but whisper ultrasonic courtship songs, *Journal of Experimental Biology,* 212(24), 4072–4078.

Nakano, R. ve diğ. (2010) To females of a noctuid moth, male courtship songs are nothing more than bat echolocation calls, *Biology Letters,* 6(5), 582–584.

Nakata, K. (2010) Attention focusing in a sit-and-wait forager: A spider controls its prey-detection ability in different web sectors by adjusting thread tension, *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences,* 277(1678), 29–33.

Nakata, K. (2013) Spatial learning affects thread tension control in orb-web spiders, *Biology Letters,* 9(4), 20130052.

Narins, P. M. ve Lewis, E. R. (1984) The vertebrate ear as an exquisite seismic sensor, *Journal of the Acoustical Society of America,* 76(5), 1384–1387.

Narins, P. M., Stoeger, A. S. ve O'Connell-Rodwell, C. (2016) Infrasonic and seismic communication in the vertebrates with special emphasis on the Afrotheria: An

update and future directions, *Vertebrate sound production and acoustic communication* içinde, Suthers, R. A. ve diğ. (haz.), 191–227. Cham: Springer.

Necker, R. (1985) Observations on the function of a slowly-adapting mechanoreceptor associated with filoplumes in the feathered skin of pigeons, *Journal of Comparative Physiology A,* 156(3), 391–394.

Neil, T. R. ve diğ. (2020) Moth wings are acoustic metamaterials, *Proceedings of the National Academy of Sciences,* 117(49), 31134–31141.

Neitz, J., Carroll, J. ve Neitz, M. (2001) Color vision: Almost reason enough for having eyes, *Optics & Photonics News,* 12(1), 26–33.

Neitz, J., Geist, T. ve Jacobs, G. H. (1989) Color vision in the dog, *Visual Neuroscience,* 3(2), 119–125.

Nesher, N. ve diğ. (2014) Self-recognition mechanism between skin and suckers prevents octopus arms from interfering with each other, *Current Biology,* 24(11), 1271–1275.

Neumeyer, C. (1992) Tetrachromatic color vision in goldfish: Evidence from color mixture experiments, *Journal of Comparative Physiology A,* 171(5), 639–649.

Neunuebel, J. P. ve diğ. (2015) Female mice ultrasonically interact with males during courtship displays, *eLife,* 4, e06203.

Nevitt, G. (2000) Olfactory foraging by Antarctic procellariiform seabirds: Life at high Reynolds numbers, *Biological Bulletin,* 198(2), 245–253.

Nevitt, G. A. (2008) Sensory ecology on the high seas: The odor world of the procellariiform seabirds, *Journal of Experimental Biology,* 211(11), 1706–1713.

Nevitt, G. A. ve Bonadonna, F. (2005) Sensitivity to dimethyl sulphide suggests a mechanism for olfactory navigation by seabirds, *Biology Letters,* 1(3), 303–305.

Nevitt, G. A. ve Hagelin, J. C. (2009) Symposium overview: Olfaction in birds: A dedication to the pioneering spirit of Bernice Wenzel and Betsy Bang, *Annals of the New York Academy of Sciences,* 1170(1), 424–427.

Nevitt, G. A., Losekoot, M. ve Weimerskirch, H. (2008) Evidence for olfactory search in wandering albatross, *Diomedea exulans, Proceedings of the National Academy of Sciences,* 105(12), 4576–4581.

Nevitt, G. A., Veit, R. R. ve Kareiva, P. (1995) Dimethyl sulphide as a foraging cue for Antarctic procellariiform seabirds, *Nature,* 376(6542), 680–682.

Newman, E. A. ve Hartline, P. H. (1982) The infrared "vision" of snakes, *Scientific American,* 246(3), 116–127.

Nicolson, A. (2018) *The seabird's cry.* New York: Henry Holt.

Niesterok, B. ve diğ. (2017) Hydrodynamic detection and localization of artificial flatfish breathing currents by harbour seals (*Phoca vitulina*), *Journal of Experimental Biology,* 220(2), 174–185.

Niimura, Y., Matsui, A. ve Touhara, K. (2014) Extreme expansion of the olfactory receptor gene repertoire in African elephants and evolutionary dynamics of orthologous gene groups in 13 placental mammals, *Genome Research,* 24(9), 1485–1496.

Nilsson, D.-E. (2009) The evolution of eyes and visually guided behaviour, *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences,* 364(1531), 2833–2847.

Nilsson, D.-E. ve diğ. (2012) A unique advantage for giant eyes in giant squid, *Current Biology,* 22(8), 683–688.

Nilsson, D.-E. ve Pelger, S. (1994) A pessimistic estimate of the time required for an eye to evolve, *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences,* 256(1345), 53–58.

Nilsson, G. (1996) Brain and body oxygen requirements of *Gnathonemus petersii,* a fish with an exceptionally large brain, *Journal of Experimental Biology,* 199(3), 603–607.

Nimpf, S. ve diğ. (2019) A putative mechanism for magnetoreception by electromagnetic induction in the pigeon inner ear, *Current Biology,* 29(23), 4052–4059.e4.

Niven, J. E. ve Laughlin, S. B. (2008) Energy limitation as a selective pressure on the evolution of sensory systems, *Journal of Experimental Biology,* 211(Pt 11), 1792–1804.

Noble, G. K. ve Schmidt, A. (1937) The structure and function of the facial and labial pits of snakes, *Proceedings of the American Philosophical Society,* 77(3), 263–288.

Noirot, E. (1966) Ultra-sounds in young rodents. I. Changes with age in albino mice, *Animal Behaviour,* 14(4), 459–462.

Noirot, I. C. ve diğ. (2009) Presence of aromatase and estrogen receptor alpha in the inner ear of zebra finches, *Hearing Research,* 252(1–2), 49–55.

Nordmann, G. C., Hochstoeger, T. ve Keays, D. A. (2017) Magnetoreception—A sense without a receptor, *PLOS Biology,* 15(10), e2003234.

Norman, L. J. ve Thaler, L. (2019) Retinotopic-like maps of spatial sound in primary "visual" cortex of blind human echolocators, *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences,* 286(1912), 20191910.

Norris, K. S. ve diğ. (1961) An experimental demonstration of echolocation behavior in the porpoise, *Tursiops truncatus* (Montagu), *Biological Bulletin,* 120(2), 163–176.

Ntelezos, A., Guarato, F. ve Windmill, J. F. C. (2016) The anti-bat strategy of ultrasound absorption: The wings of nocturnal moths (Bombycoidea: Saturniidae) absorb more ultrasound than the wings of diurnal moths (Chalcosiinae: Zygaenoidea: Zygaenidae), *Biology Open,* 6(1), 109–117.

O'Carroll, D. C. ve Warrant, E. J. (2017) Vision in dim light: Highlights and challenges, *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences,* 372(1717), 20160062.

O'Connell, C. (2008) *The elephant's secret sense: The hidden life of the wild herds of Africa.* Chicago: University of Chicago Press.

O'Connell, C. E., Arnason, B. T. ve Hart, L. A. (1997) Seismic transmission of elephant vocalizations and movement, *Journal of the Acoustical Society of America,* 102(5), 3124.

O'Connell-Rodwell, C. E. ve diğ. (2006) Wild elephant (*Loxodonta africana*) breeding herds respond to artificially transmitted seismic stimuli, *Behavioral Ecology and Sociobiology,* 59(6), 842–850.

O'Connell-Rodwell, C. E. ve diğ. (2007) Wild African elephants (*Loxodonta africana*) discriminate between familiar and unfamiliar conspecific seismic alarm calls, *Journal of the Acoustical Society of America,* 122(2), 823–830.

O'Connell-Rodwell, C. E., Hart, L. A. ve Arnason, B. T. (2001) Exploring the potential use of seismic waves as a communication channel by elephants and other large mammals, *American Zoologist,* 41(5), 1157–1170.

Olson, C. R. ve diğ. (2018) Black Jacobin hummingbirds vocalize above the known hearing range of birds, *Current Biology,* 28(5), R204–R205.

Osorio, D. ve Vorobyev, M. (1996) Colour vision as an adaptation to frugivory in primates, *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences,* 263(1370), 593–599.

Osorio, D. ve Vorobyev, M. (2008) A review of the evolution of animal colour vision and visual communication signals, *Vision Research,* 48(20), 2042–2051.

Ossiannilsson, F. (1949) Insect drummers, a study on the morphology and function of the sound-producing organ of Swedish *Homoptera auchenorrhyncha,* with notes on their sound-production. İnceleme, Entomologika sällskapet i Lund.

Owen, M. A. ve diğ. (2015) An experimental investigation of chemical communication in the polar bear: Scent communication in polar bears, *Journal of Zoology,* 295(1), 36–43.

Owens, A. C. S. ve diğ. (2020) Light pollution is a driver of insect declines, *Biological Conserva- tion,* 241, 108259.

Owens, G. L. ve diğ. (2012) In the four-eyed fish (*Anableps anableps*), the regions of the retina exposed to aquatic and aerial light do not express the same set of opsin genes, *Biology Letters,* 8(1), 86–89.

Pack, A. ve Herman, L. (1995) Sensory integration in the bottlenosed dolphin: Immediate recognition of complex shapes across the senses of echolocation and vision, *Journal of the Acoustical Society of America,* 98, 722–33.

Page, R. A. ve Ryan, M. J. (2008) The effect of signal complexity on localization performance in bats that localize frog calls, *Animal Behaviour,* 76(3), 761–769.

Pain, S. (2001) Stench warfare, *New Scientist.* Available at: www.newscientist.com/article/ mg17122984-600-stench-warfare/.

Palmer, B. A. ve diğ. (2017) The image-forming mirror in the eye of the scallop, *Science,* 358(6367), 1172–1175.

Panksepp, J. ve Burgdorf, J. (2000) 50-kHz chirping (laughter?) in response to conditioned and unconditioned tickle-induced reward in rats: Effects of social housing and genetic variables, *Behavioural Brain Research,* 115(1), 25–38.

Park, T. J. ve diğ. (2008) Selective inflammatory pain insensitivity in the African naked mole-rat (*Heterocephalus glaber*), *PLOS Biology,* 6(1), e13.

Park, T. J. ve diğ. (2017) Fructose-driven glycolysis supports anoxia resistance in the naked mole-rat, *Science,* 356(6335), 307–311.

Park, T. J., Lewin, G. R. ve Buffenstein, R. (2010) Naked mole rats: Their extraordinary sensory world, *Encyclopedia of animal behavior* içinde, Breed, M. ve Moore, J. (haz.), s. 505–512. Amsterdam: Elsevier.

Parker, A. (2004) *In the blink of an eye: How vision sparked the big bang of evolution.* New York: Basic Books.

Partridge, B. L. ve Pitcher, T. J. (1980) The sensory basis of fish schools: Relative roles of lateral line and vision, *Journal of Comparative Physiology,* 135(4), 315–325.

Partridge, J. C. ve diğ. (2014) Reflecting optics in the diverticular eye of a deep-sea barreleye fish (*Rhynchohyalus natalensis*), *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences,* 281(1782), 20133223.

Patek, S. N., Korff, W. L. ve Caldwell, R. L. (2004) Deadly strike mechanism of a mantis shrimp, *Nature,* 428(6985), 819–820.

Patton, P., Windsor, S. ve Coombs, S. (2010) Active wall following by Mexican blind cavefish (*Astyanax mexicanus*), *Journal of Comparative Physiology A,* 196(11), 853–867.

Paul, S. C. ve Stevens, M. (2020) Horse vision and obstacle visibility in horseracing, *Applied Animal Behaviour Science,* 222, 104882.

Paulin, M. G. (1995) Electroreception and the compass sense of sharks, *Journal of Theoretical Biology,* 174(3), 325–339.

Payne, K. (1999) *Silent thunder: In the presence of elephants.* Londra: Penguin.

Payne, K. B., Langbauer, W. R. ve Thomas, E. M. (1986) Infrasonic calls of the Asian elephant (*Elephas maximus*), *Behavioral Ecology and Sociobiology,* 18(4), 297–301.

Payne, R. S. (1971) Acoustic location of prey by barn owls (*Tyto alba*), *Journal of Experimental Biology,* 54(3), 535–573.

Payne, R. S. ve McVay, S. (1971) Songs of humpback whales, *Science,* 173(3997), 585–597.

Payne, R. ve Webb, D. (1971) Orientation by means of long range acoustic signaling in baleen whales, *Annals of the New York Academy of Sciences,* 188(1 Orientation), 110–141.

Peichl, L. (2005) Diversity of mammalian photoreceptor properties: Adaptations to habitat and lifestyle?, *The Anatomical Record Part A: Discoveries in Molecular, Cellular, and Evolutionary Biology,* 287A(1), 1001–1012.

Peichl, L., Behrmann, G. ve Kröger, R. H. (2001) For whales and seals the ocean is not blue: A visual pigment loss in marine mammals, *The European Journal of Neuroscience,* 13(8), 1520–1528.

Perry, M. W. ve Desplan, C. (2016) Love spots, *Current Biology,* 26(12), R484–R485.

Persons, W. S. ve Currie, P. J. (2015) Bristles before down: A new perspective on the functional origin of feathers, *Evolution: International Journal of Organic Evolution,* 69(4), 857–862.

Pettigrew, J. D., Manger, P. R. ve Fine, S. L. B. (1998) The sensory world of the platypus, *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences,* 353(1372), 1199–1210.

Phillips, J. N. ve diğ. (2019) Background noise disrupts host-parasitoid interactions, *Royal Society Open Science,* 6(9), 190867.

Phippen, J. W. (2016) "Kill every buffalo you can! Every buffalo dead is an Indian gone,"

The Atlantic. Available at: www.theatlantic.com/national/archive/2016/05/the-buffalo-killers/482349/.

Picciani, N. ve diğ. (2018) Prolific origination of eyes in Cnidaria with co-option of non-visual opsins, *Current Biology,* 28(15), 2413–2419.e4.

Piersma, T. ve diğ. (1995) Holling's functional response model as a tool to link the food-finding mechanism of a probing shorebird with its spatial distribution, *Journal of Animal Ecology,* 64(4), 493–504.

Piersma, T. ve diğ. (1998) A new pressure sensory mechanism for prey detection in birds: The use of principles of seabed dynamics?, *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences,* 265(1404), 1377–1383.

Pihlström, H. ve diğ. (2005) Scaling of mammalian ethmoid bones can predict olfactory organ size and performance, *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences,* 272(1566), 957–962.

Pitcher, T. J., Partridge, B. L. ve Wardle, C. S. (1976) A blind fish can school, *Science,* 194(4268), 963–965.

Plachetzki, D. C., Fong, C. R. ve Oakley, T. H. (2012) Cnidocyte discharge is regulated by light and opsin-mediated phototransduction, *BMC Biology,* 10(1), 17.

Plotnik, J. M. ve diğ. (2019) Elephants have a nose for quantity, *Proceedings of the National Academy of Sciences,* 116(25), 12566–12571.

Pointer, M. R. ve Attridge, G. G. (1998) The number of discernible colours, *Color Research & Application,* 23(1), 52–54.

Polajnar, J. ve diğ. (2015) Manipulating behaviour with substrate-borne vibrations—Potential for insect pest control, *Pest Management Science,* 71(1), 15–23.

Polilov, A. A. (2012) The smallest insects evolve anucleate neurons, *Arthropod Structure & Development,* 41(1), 29–34.

Pollack, L. (2012) Historical series: Magnetic sense of birds. Erişim adresi: www.ks.uiuc.edu/History/magnetoreception/.

Poole, J. H. ve diğ. (1988) The social contexts of some very low frequency calls of African elephants, *Behavioral Ecology and Sociobiology,* 22(6), 385–392.

Popper, A. N. ve diğ. (2004) Response of clupeid fish to ultrasound: A review, *ICES Journal of Marine Science,* 61(7), 1057–1061.

Porter, J. ve diğ. (2007) Mechanisms of scent-tracking in humans, *Nature Neuroscience,* 10(1), 27–29.

Porter, M. L. ve diğ. (2012) Shedding new light on opsin evolution, *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences,* 279(1726), 3–14.

Porter, M. L. ve Sumner-Rooney, L. (2018) Evolution in the dark: Unifying our understanding of eye loss, *Integrative and Comparative Biology,* 58(3), 367–371.

Potier, S. ve diğ. (2017) Eye size, fovea, and foraging ecology in accipitriform raptors, *Brain, Behavior and Evolution,* 90(3), 232–242.

Poulet, J. F. A. ve Hedwig, B. (2003) A corollary discharge mechanism modulates central auditory processing in singing crickets, *Journal of Neurophysiology,* 89(3), 1528–1540.

Poulson, S. J. ve diğ. (2020) Naked mole-rats lack cold sensitivity before and after nerve injury, *Molecular Pain,* 16, 1744806920955103.

Prescott, T. J., Diamond, M. E. ve Wing, A. M. (2011) Active touch sensing, *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences,* 366(1581), 2989–2995.

Prescott, T. J. ve Dürr, V. (2015) The world of touch, *Scholarpedia,* 10(4), 32688.

Prescott, T. J., Mitchinson, B. ve Grant, R. (2011) Vibrissal behavior and function, *Scholarpedia,* 6(10), 6642.

Primack, R. B. (1982) Ultraviolet patterns in flowers, or flowers as viewed by insects, *Arnoldia,* 42(3), 139–146.

Prior, N. H. ve diğ. (2018) Acoustic fine structure may encode biologically relevant information for zebra finches, *Scientific Reports,* 8(1), 6212.

Proske, U. ve Gregory, E. (2003) Electrolocation in the platypus—Some speculations, *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology,* 136(4), 821–825.

Proust, M. (1993) *In search of lost time,* cilt 5, çev. C. K. Scott Moncrieff ve Terence Kilmartin. New York: Modern Library; Türkçesi: *Kayıp Zamanın İzinde*, çev. Roza Hakmen, İstanbul: YKY, 2010.

Putman, N. F. ve diğ. (2013) Evidence for geomagnetic imprinting as a homing mechanism in Pacific salmon, *Current Biology,* 23(4), 312–316.

Pye, D. (2004) Poem by David Pye: On the variety of hearing organs in insects, *Microscopic Research Techniques,* 63, 313–314.

Pyenson, N. D. ve diğ. (2012) Discovery of a sensory organ that coordinates lunge feeding in rorqual whales, *Nature,* 485(7399), 498–501.

Pynn, L. K. ve DeSouza, J. F. X. (2013) The function of efference copy signals: Implications for symptoms of schizophrenia, *Vision Research,* 76, 124–133.

Pytte, C. L., Ficken, M. S., Moiseff, A. (2004) Ultrasonic singing by the blue-throated hummingbird: A comparison between production and perception, *Journal of Comparative Physiology A,* 190(8), 665–673.

Qin, S. ve diğ. (2016) A magnetic protein biocompass, *Nature Materials,* 15(2), 217–226.

Quignon, P. ve diğ. (2012) Genetics of canine olfaction and receptor diversity, *Mammalian Genome,* 23(1–2), 132–143.

Raad, H. ve diğ. (2016) Functional gustatory role of chemoreceptors in *Drosophila* wings, *Cell Reports;* 15(7), 1442–1454.

Radinsky, L. B. (1968) Evolution of somatic sensory specialization in otter brains, *Journal of Comparative Neurology,* 134(4), 495–505.

Ramey, E. ve diğ. (2013) Desert-dwelling African elephants (*Loxodonta africana*) in Namibia dig wells to purify drinking water, *Pachyderm,* 53, 66–72.

Ramey, S. (2020) *The lady's handbook for her mysterious illness.* Londra: Fleet.

Ramsier, M. A. ve diğ. (2012) Primate communication in the pure ultrasound, *Biology Letters,* 8(4), 508–511.

Rasmussen, L. E. L. ve diğ. (1996) Insect pheromone in elephants, *Nature,* 379(6567), 684.

Rasmussen, L. E. L. ve Krishnamurthy, V. (2000) How chemical signals integrate Asian elephant society: The known and the unknown, *Zoo Biology,* 19(5), 405–423.

Rasmussen, L. E. L. ve Schulte, B. A. (1998) Chemical signals in the reproduction of Asian (*Elephas maximus*) and African (*Loxodonta africana*) elephants, *Animal Reproduction Science,* 53(1–4), 19–34.

Ratcliffe, J. M. ve diğ. (2013) How the bat got its buzz, *Biology Letters,* 9(2), 20121031.

Ravaux, J. ve diğ. (2013) Thermal limit for Metazoan life in question: In vivo heat tolerance of the Pompeii worm, *PLOS One,* 8(5), e64074.

Ravia, A. ve diğ. (2020) A measure of smell enables the creation of olfactory metamers, *Nature,* 588(7836), 118–123.

Reep, R. L., Marshall, C. D. ve Stoll, M. L. (2002) Tactile hairs on the postcranial body in Florida manatees: A mammalian lateral line?, *Brain, Behavior and Evolution,* 59(3), 141–154.

Reep, R. ve Sarko, D. (2009) Tactile hair in manatees, *Scholarpedia,* 4(4), 6831.

Reilly, S. C. ve diğ. (2008) Novel candidate genes identified in the brain during nociception in common carp (*Cyprinus carpio*) and rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*), *Neuroscience Letters,* 437(2), 135–138.

Reymond, L. (1985) Spatial visual acuity of the eagle *Aquila audax:* A behavioural, optical and anatomical investigation, *Vision Research,* 25(10), 1477–1491.

Reynolds, R. P. ve diğ. (2010) Noise in a laboratory animal facility from the human and mouse perspectives, *Journal of the American Association for Laboratory Animal Science,* 49(5), 592–597.

Ridgway, S. H. ve Au, W. W. L. (2009) Hearing and echolocation in dolphins, *Encyclopedia of neuroscience* içinde, Squire, L. R. (haz.), s. 1031–1039. Amsterdam: Elsevier.

Riitters, K. H. ve Wickham, J. D. (2003) How far to the nearest road?, *Frontiers in Ecology and the Environment,* 1(3), 125–129.

Ritz, T., Adem, S. ve Schulten, K. (2000) A model for photoreceptor-based magneto-reception in birds, *Biophysical Journal,* 78(2), 707–718.

Robert, D., Amoroso, J. ve Hoy, R. (1992) The evolutionary convergence of hearing in a parasitoid fly and its cricket host, *Science,* 258(5085), 1135–1137.

Robert, D., Mhatre, N. ve McDonagh, T. (2010) The small and smart sensors of insect auditory systems, *2010 Dokuzuncu IEEE Sensörler Konferansı (SENSORS 2010),* 2208–2211. Kona, HI: IEEE. Erişim adresi: ieeexplore.ieee.org/document/5690624/.

Roberts, S. A. ve diğ. (2010) Darcin: A male pheromone that stimulates female memory and sexual attraction to an individual male's odour, *BMC Biology,* 8(1), 75.

Robinson, M. H. ve Mirick, H. (1971) The predatory behavior of the golden-web spider *Nephila clavipes* (Araneae: Araneidae), *Psyche,* 78(3), 123–139.

Rogers, L. J. (2012) The two hemispheres of the avian brain: Their differing roles in perceptual processing and the expression of behavior, *Journal of Ornithology,* 153(1), 61–74.

Rolland, R. M. ve diğ. (2012) Evidence that ship noise increases stress in right whales, *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences,* 279(1737), 2363–2368.

Ros, M. (1935) Die Lippengruben der Pythonen als Temperaturorgane, *Jenaische Zeitschrift für Naturwissenschaft,* 70, 1–32.

Rose, J. D. ve diğ. (2014) Can fish really feel pain?, *Fish and Fisheries,* 15(1), 97–133.

Rowe, A. H. ve diğ. (2013) Voltage-gated sodium channel in grasshopper mice defends against bark scorpion toxin, *Science,* 342(6157), 441–446.

Rubin, J. J. ve diğ. (2018) The evolution of anti-bat sensory illusions in moths, *Science Advances,* 4(7), eaar7428.

Ruck, P. (1958) A comparison of the electrical responses of compound eyes and dorsal ocelli in four insect species, *Journal of Insect Physiology,* 2(4), 261–274.

Rundus, A. S. ve diğ. (2007) Ground squirrels use an infrared signal to deter rattlesnake predation, *Proceedings of the National Academy of Sciences,* 104(36), 14372–14376.

Ryan, M. J. (1980) Female mate choice in a neotropical frog, *Science,* 209(4455), 523–525.

Ryan, M. J. (2018) *A taste for the beautiful: The evolution of attraction.* Princeton, NJ: Princeton University Press.

Ryan, M. J. ve diğ. (1990) Sexual selection for sensory exploitation in the frog *Physalaemus pustulosus, Nature,* 343(6253), 66–67.

Ryan, M. J. ve Rand, A. S. (1993) Sexual selection and signal evolution: The ghost of biases past, *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences,* 340(1292), 187–195.

Rycyk, A. M. ve diğ. (2018) Manatee behavioral response to boats, *Marine Mammal Science,* 34(4), 924–962.

Ryerson, W. (2014) Why snakes flick their tongues: A fluid dynamics approach. Yayımlanmamış tez, Connecticut Üniversitesi.

Sacks, O. ve Wasserman, R. (1987) The case of the colorblind painter, *The New York Review of Books,* 19 Kasım. Erişim adresi: www.nybooks.com/articles/1987/11/19/the-case-of -the-colorblind-painter/.

Saito, C. A. ve diğ. (2004) Alouatta trichromatic color vision—single-unit recording from retinal ganglion cells and microspectrophotometry, *Investigative Ophthalmology & Visual Science,* 45, 4276.

Salazar, V. L., Krahe, R. ve Lewis, J. E. (2013) The energetics of electric organ discharge generation in gymnotiform weakly electric fish, *Journal of Experimental Biology,* 216(13), 2459–2468.

Sales, G. D. (2010) Ultrasonic calls of wild and wild-type rodents, *Handbook of behavioral neuroscience* içinde, Brudzynski, S. (haz.), cilt 19, s. 77–88. Amsterdam: Elsevier.

Sanders, D. ve diğ. (2021) A meta-analysis of biological impacts of artificial light at night, *Nature Ecology & Evolution,* 5(1), 74–81.

Sarko, D. K., Rice, F. L. ve Reep, R. L. (2015) Elaboration and innervation of the vibrissal system in the rock hyrax (*Procavia capensis*), *Brain, Behavior and Evolution,* 85(3), 170–188.

Savoca, M. S. ve diğ. (2016) Marine plastic debris emits a keystone infochemical for olfactory foraging seabirds, *Science Advances,* 2(11), e1600395.

Sawtell, N. B. (2017) Neural mechanisms for predicting the sensory consequences of behavior: Insights from electrosensory systems, *Annual Review of Physiology,* 79(1), 381–399.

Scanlan, M. M. ve diğ. (2018) Magnetic map in nonanadromous Atlantic salmon, *Proceedings of the National Academy of Sciences,* 115(43), 10995–10999.

Schevill, W. E. ve McBride, A. F. (1956) Evidence for echolocation by cetaceans, *Deep Sea Research,* 3(2), 153–154.

Schevill, W. E., Watkins, W. A. ve Backus, R. H. (1964) The 20-cycle signals and *Balaenoptera* (fin whales), *Marine bio-acoustics* içinde, Tavolga, W. N. (haz.), 147–152. Oxford: Pergamon Press.

Schiestl, F. P. ve diğ. (2000) Sex pheromone mimicry in the early spider orchid (*Ophrys sphegodes*): Patterns of hydrocarbons as the key mechanism for pollination by sexual deception, *Journal of Comparative Physiology A,* 186(6), 567–574.

Schmitz, H. ve Bleckmann, H. (1998) The photomechanic infrared receptor for the detection of forest fires in the beetle *Melanophila acuminata* (Coleoptera: Buprestidae), *Journal of Comparative Physiology A,* 182(5), 647–657.

Schmitz, H. ve Bousack, H. (2012) Modelling a historic oil-tank fire allows an estimation of the sensitivity of the infrared receptors in pyrophilous *Melanophila* beetles, *PLOS One,* 7(5), e37627.

Schmitz, H., Schmitz, A. ve Schneider, E. S. (2016) Matched filter properties of infrared receptors used for fire and heat detection in insects, *The ecology of animal senses* içinde, von der Emde, G. ve Warrant, E. (haz.), s. 207–234. Cham: Springer.

Schneider, E. R. ve diğ. (2014) Neuronal mechanism for acute mechanosensitivity in tactile-foraging waterfowl, *Proceedings of the National Academy of Sciences,* 111(41), 14941–14946.

Schneider, E. R. ve diğ. (2017) Molecular basis of tactile specialization in the duck bill, *Proceedings of the National Academy of Sciences,* 114(49), 13036–13041.

Schneider, E. R. ve diğ. (2019) A cross-species analysis reveals a general role for Piezo2 in mechanosensory specialization of trigeminal ganglia from tactile specialist birds, *Cell Reports,* 26(8), 1979–1987.e3.

Schneider, E. S., Schmitz, A. ve Schmitz, H. (2015) Concept of an active amplification mechanism in the infrared organ of pyrophilous *Melanophila* beetles, *Frontiers in Physiology,* 6, 391.

Schneider, W. T. ve diğ. (2018) Vestigial singing behaviour persists after the evolutionary loss of song in crickets, *Biology Letters,* 14(2), 20170654.

Schneirla, T. C. (1944) A unique case of circular milling in ants, considered in relation to trail following and the general problem of orientation, *American Museum Novitates,* no. 1253.

Schnitzler, H.-U. (1967) Kompensation von Dopplereffekten bei Hufeisen-Fledermäusen, *Naturwissenschaften,* 54(19), 523.

Schnitzler, H.-U. (1973) Control of Doppler shift compensation in the greater horseshoe bat, *Rhinolophus ferrumequinum, Journal of Comparative Physiology,* 82(1), 79–92.

Schnitzler, H.-U. ve Denzinger, A. (2011) Auditory fovea and Doppler shift compensation: Adaptations for flutter detection in echolocating bats using CF-FM signals, *Journal of Comparative Physiology A,* 197(5), 541–559.

Schnitzler, H.-U. ve Kalko, E. K. V. (2001) Echolocation by insect-eating bats, *BioScience,* 51(7), 557–569.

Schraft, H. A., Bakken, G. S. ve Clark, R. W. (2019) Infrared-sensing snakes select ambush orientation based on thermal backgrounds, *Scientific Reports,* 9(1), 3950.

Schraft, H. A. ve Clark, R. W. (2019) Sensory basis of navigation in snakes: The relative importance of eyes and pit organs, *Animal Behaviour,* 147, 77–82.

Schraft, H. A., Goodman, C. ve Clark, R. W. (2018) Do free-ranging rattlesnakes use thermal cues to evaluate prey?, *Journal of Comparative Physiology A,* 204(3), 295–303.

Schrope, M. (2013) Giant squid filmed in its natural environment, *Nature,* doi. org/10.1038/nature.2013.12202.

Schuergers, N. ve diğ. (2016) Cyanobacteria use micro-optics to sense light direction, *eLife,* 5, e12620.

Schuller, G. ve Pollak, G. (1979) Disproportionate frequency representation in the inferior colliculus of Doppler-compensating greater horseshoe bats: Evidence for an acoustic fovea, *Journal of Comparative Physiology,* 132(1), 47–54.

Schulten, K., Swenberg, C. E. ve Weller, A. (1978) A biomagnetic sensory mechanism based on magnetic field modulated coherent electron spin motion, *Zeitschrift für Physikalische Chemie,* 111(1), 1–5.

Schumacher, S. ve diğ. (2016) Cross-modal object recognition and dynamic weighting of sensory inputs in a fish, *Proceedings of the National Academy of Sciences,* 113(27), 7638–7643.

Schusterman, R. J. ve diğ. (2000) Why pinnipeds don't echolocate, *Journal of the Acoustical Society of America,* 107(4), 2256–2264.

Schütz, S. ve diğ. (1999) Insect antenna as a smoke detector, *Nature,* 398(6725), 298–299.

Schwenk, K. (1994) Why snakes have forked tongues, *Science,* 263(5153), 1573–1577.

Secor, S. M. (2008) Digestive physiology of the Burmese python: Broad regulation of integrated performance, *Journal of Experimental Biology,* 211(24), 3767–3774. Seehausen, O. ve diğ. (2008) Speciation through sensory drive in cichlid fish, *Nature,* 455(7213), 620–626.

Seehausen, O., van Alphen, J. J. M. ve Witte, F. (1997) Cichlid fish diversity threatened by eutrophication that curbs sexual selection, *Science,* 277(5333), 1808–1811.

Seidou, M. ve diğ. (1990) On the three visual pigments in the retina of the firefly squid, *Watasenia scintillans, Journal of Comparative Physiology A,* 166, 769–773.

Seneviratne, S. S. ve Jones, I. L. (2008) Mechanosensory function for facial ornamentation in the whiskered auklet, a crevice-dwelling seabird, *Behavioral Ecology,* 19(4), 784–790.

Sengupta, P. ve Garrity, P. (2013) Sensing temperature, *Current Biology,* 23(8), R304–R307.

Senzaki, M. ve diğ. (2016) Traffic noise reduces foraging efficiency in wild owls, *Scientific Reports,* 6(1), 30602.

Sewell, G. D. (1970) Ultrasonic communication in rodents, *Nature,* 227(5256), 410.

Seyfarth, E.-A. (2002) Tactile body raising: Neuronal correlates of a "simple" behavior in spiders, *European Arachnology 2000: Proceedings of the 19th European College of Arachnology* içinde, Toft, S. ve Scharff, N. (haz.), s. 19–32. Aarhus: Aarhus University Press.

Shadwick, R. E., Potvin, J. ve Goldbogen, J. A. (2019) Lunge feeding in rorqual whales, *Physiology,* 34(6), 409–418.

Shamble, P. S. ve diğ. (2016) Airborne acoustic perception by a jumping spider, *Current Biology,* 26(21), 2913–2920.

Shan, L. ve diğ. (2018) Lineage-specific evolution of bitter taste receptor genes in the giant and red pandas implies dietary adaptation, *Integrative Zoology,* 13(2), 152–159.

Shannon, G. ve diğ. (2014) Road traffic noise modifies behaviour of a keystone species, *Animal Behaviour,* 94, 135–141.

Shannon, G. ve diğ. (2016) A synthesis of two decades of research documenting the effects of noise on wildlife: Effects of anthropogenic noise on wildlife, *Biological Reviews,* 91(4), 982–1005.

Sharma, K. R. ve diğ. (2015) Cuticular hydrocarbon pheromones for social behavior and their coding in the ant antenna, *Cell Reports,* 12(8), 1261–1271.

Shaw, J. ve diğ. (2015) Magnetic particle-mediated magnetoreception, *Journal of the Royal Society Interface,* 12(110), 20150499.

Sherrington, C. S. (1903) Qualitative difference of spinal reflex corresponding with qualitative difference of cutaneous stimulus, *Journal of Physiology,* 30(1), 39–46.

Shimozawa, T., Murakami, J. ve Kumagai, T. (2003) Cricket wind receptors: Thermal noise for the highest sensitivity known, *Sensors and sensing in biology and engineering* içinde, Barth, F. G., Humphrey, J. A. C. ve Secomb, T. W. (haz.), s. 145–157. Viyana: Springer.

Shine, R. ve diğ. (2002) Antipredator responses of free-ranging pit vipers (*Gloydius shedaoensis,* Viperidae), *Copeia,* 2002(3), 843–850.

Shine, R. ve diğ. (2003) Chemosensory cues allow courting male garter snakes to assess body length and body condition of potential mates, *Behavioral Ecology and Sociobiology,* 54(2), 162–166.

Sidebotham, J. (1877) Singing mice, *Nature,* 17(419), 29.

Siebeck, U. E. ve diğ. (2010) A species of reef fish that uses ultraviolet patterns for covert face recognition, *Current Biology,* 20(5), 407–410.

Sieck, M. H. ve Wenzel, B. M. (1969) Electrical activity of the olfactory bulb of the pigeon, *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology,* 26(1), 62–69.

Siemers, B. M. ve. (2009) Why do shrews twitter? Communication or simple echo-based orientation, *Biology Letters,* 5(5), 593–596.

Silpe, J. E. ve Bassler, B. L. (2019) A host-produced quorum-sensing autoinducer controls a phage lysis-lysogeny decision, *Cell,* 176(1–2), 268–280.e13.

Simmons, J. A., Ferragamo, M. J. ve Moss, C. F. (1998) Echo-delay resolution in sonar images of the big brown bat, *Eptesicus fuscus, Proceedings of the National Academy of Sciences,* 95(21), 12647–12652.

Simmons, J. A. ve Stein, R. A. (1980) Acoustic imaging in bat sonar: Echolocation signals and the evolution of echolocation, *Journal of Comparative Physiology,* 135(1), 61–84.

Simões, J. M. ve diğ. (2021) Robustness and plasticity in *Drosophila* heat avoidance, *Nature Communications,* 12(1), 2044.

Simons, E. (2020) Backyard fly training and you, *Bay Nature.* Erişim adresi: baynature.org/article/ lord-of-the-flies/.

Simpson, S. D. ve diğ. (2016) Anthropogenic noise increases fish mortality by predation, *Nature Communications,* 7(1), 10544.

Sisneros, J. A. (2009) Adaptive hearing in the vocal plainfin midshipman fish: Getting in tune for the breeding season and implications for acoustic communication, *Integrative Zoology,* 4(1), 33–42.

Skedung, L. ve diğ. (2013) Feeling small: Exploring the tactile perception limits, *Scientific Reports,* 3(1), 2617.

Slabbekoorn, H. ve Peet, M. (2003) Birds sing at a higher pitch in urban noise, *Nature,* 424(6946), 267.

Smith, A. C. ve diğ. (2003) The effect of colour vision status on the detection and selection of fruits by tamarins (*Saguinus* spp.), *Journal of Experimental Biology,* 206(18), 3159–3165.

Smith, B. ve diğ. (2004) A survey of frog odorous secretions, their possible functions and phylogenetic significance, *Applied Herpetology,* 2, 47–82.

Smith, C. F. ve diğ. (2009) The spatial and reproductive ecology of the copperhead (*Agkistrodon contortrix*) at the northeastern extreme of its range, *Herpetological Monographs,* 23(1), 45–73.

Smith, E. St. J. ve diğ. (2011) The molecular basis of acid insensitivity in the African naked mole-rat, *Science,* 334(6062), 1557–1560.

Smith, E. St. J., Park, T. J. ve Lewin, G. R. (2020) Independent evolution of pain insensitivity in African mole-rats: Origins and mechanisms, *Journal of Comparative Physiology A,* 206(3), 313–325.

Smith, F. A. ve diğ. (2018) Body size downgrading of mammals over the late Quaternary, *Science,* 360(6386), 310–313.

Smith, L. M. ve diğ. (2020) Impacts of COVID-19-related social distancing measures on personal environmental sound exposures, *Environmental Research Letters,* 15(10), 104094.

Sneddon, L. (2013) Do painful sensations and fear exist in fish?, *Animal suffering: From science to law* içinde, van der Kemp, T. ve Lachance, M. (haz.), s. 93–112. Toronto: Carswell.

Sneddon, L. U. (2018) Comparative physiology of nociception and pain, *Physiology,* 33(1), 63–73.

Sneddon, L. U. (2019) Evolution of nociception and pain: Evidence from fish models, *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences,* 374(1785), 20190290.

Sneddon, L. U. ve diğ. (2014) Defining and assessing animal pain, *Animal Behaviour,* 97, 201–212.

Sneddon, L. U., Braithwaite, V. A. ve Gentle, M. J. (2003a) Do fishes have nociceptors? Evidence for the evolution of a vertebrate sensory system, *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences,* 270(1520), 1115–1121.

Sneddon, L. U., Braithwaite, V. A. ve Gentle, M. J. (2003b) Novel object test: Examining nociception and fear in the rainbow trout, *Journal of Pain,* 4(8), 431–440.

Snyder, J. B. ve diğ. (2007) Omnidirectional sensory and motor volumes in electric fish, *PLOS Biology,* 5(11), e301.

Soares, D. (2002) An ancient sensory organ in crocodilians, *Nature,* 417(6886), 241–242.

Sobel, N. ve diğ. (1999) The world smells different to each nostril, *Nature,* 402(6757), 35.

Solvi, C., Gutierrez Al-Khudhairy, S. ve Chittka, L. (2020) Bumble bees display cross-modal object recognition between visual and tactile senses, *Science,* 367(6480), 910–912.

Speiser, D. I. ve Johnsen, S. (2008a) Comparative morphology of the concave mirror eyes of scallops (Pectinoidea), *American Malacological Bulletin,* 26(1–2), 27–33.

Speiser, D. I. ve Johnsen, S. (2008b) Scallops visually respond to the size and speed of virtual particles, *Journal of Experimental Biology,* 211(Pt 13), 2066–2070.

Sperry, R. W. (1950) Neural basis of the spontaneous optokinetic response produced by visual inversion, *Journal of Comparative and Physiological Psychology,* 43(6), 482–489.

Spoelstra, K. ve diğ. (2017) Response of bats to light with different spectra: Light-shy and agile bat presence is affected by white and green, but not red light, *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences,* 284(1855), 20170075.

Stack, D. W. ve diğ. (2011) Reducing visitor noise levels at Muir Woods National Monument using experimental management, *Journal of the Acoustical Society of America,* 129(3), 1375–1380.

Stager, K. E. (1964) The role of olfaction in food location by the turkey vulture (*Cathartes aura*), *Contributions in Science,* 81, 1–63.

Stamp Dawkins, M. (2002) What are birds looking at? Head movements and eye use in chickens, *Animal Behaviour,* 63(5), 991–998.

Standing Bear, L. (2006) *Land of the spotted eagle.* Lincoln: Bison Books.

Stangl, F. B. ve diğ. (2005) Comments on the predator-prey relationship of the Texas kangaroo rat (*Dipodomys elator*) and barn owl (*Tyto alba*), *The American Midland Naturalist,* 153(1), 135–141.

Stebbins, W. C. (1983) *The acoustic sense of animals.* Cambridge, MA: Harvard University Press.

Steen, J. B. ve diğ. (1996) Olfaction in bird dogs during hunting, *Acta Physiologica Scandinavica,* 157(1), 115–119.

Sterbing-D'Angelo, S. J. ve diğ. (2017) Functional role of airflow-sensing hairs on the bat wing, *Journal of Neurophysiology,* 117(2), 705–712.

Sterbing-D'Angelo, S. J. ve Moss, C. F. (2014) Air flow sensing in bats, *Flow sensing in air and water* içinde, Bleckmann, H., Mogdans, J. ve Coombs, S. L. (haz.), s. 197–213. Berlin: Springer.

Stevens, M. ve Cuthill, I. C. (2007) Hidden messages: Are ultraviolet signals a special channel in avian communication?, *BioScience,* 57(6), 501–507.

Stiehl, W. D., Lalla, L. ve Breazeal, C. (2004) A "somatic alphabet" approach to "sensitive skin," *Proceedings, ICRA '04, IEEE International Conference on Robotics and Automation 2004* içinde, 3, 2865–2870. New Orleans: IEEE.

Stoddard, M. C. ve diğ. (2019) I see your false colours: How artificial stimuli appear to different animal viewers, *Interface Focus,* 9(1), 20180053.

Stoddard, M. C. ve diğ. (2020) Wild hummingbirds discriminate nonspectral colors, *Proceedings of the National Academy of Sciences,* 117(26), 15112–15122.

Stokkan, K.-A. ve diğ. (2013) Shifting mirrors: Adaptive changes in retinal reflections to winter darkness in Arctic reindeer, *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences,* 280(1773), 20132451.

Stowasser, A. ve diğ. (2010) Biological bifocal lenses with image separation, *Current Biology,* 20(16), 1482–1486.

Strauß, J. ve Stumpner, A. (2015) Selective forces on origin, adaptation and reduction of tympanal ears in insects, *Journal of Comparative Physiology A,* 201(1), 155–169.

Strobel, S. M. ve diğ. (2018) Active touch in sea otters: In-air and underwater texture discrimination thresholds and behavioral strategies for paws and vibrissae, *Journal of Experimental Biology,* 221(18), jeb181347.

Suga, N. ve Schlegel, P. (1972) Neural attenuation of responses to emitted sounds in echolocating bats, *Science,* 177(4043), 82–84.

Sukhum, K. V. ve diğ. (2016) The costs of a big brain: Extreme encephalization results in higher energetic demand and reduced hypoxia tolerance in weakly electric African fishes, *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences,* 283(1845), 20162157.

Sullivan, J. J. (2013) One of us, *Lapham's Quarterly.* Erişim adresi: www.laphamsquarterly.org/animals/one-us.

Sumbre, G. ve diğ. (2006) Octopuses use a human-like strategy to control precise point-to-point arm movements, *Current Biology,* 16(8), 767–772.

Sumner-Rooney, L. ve diğ. (2018) Whole-body photoreceptor networks are indepen-

dent of "lenses" in brittle stars, *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences,* 285(1871), 20172590.

Sumner-Rooney, L. H. ve diğ. (2014) Do chitons have a compass? Evidence for magnetic sensitivity in *Polyplacophora, Journal of Natural History,* 48(45–48), 3033–3045.

Sumner-Rooney, L. H. ve diğ. (2020) Extraocular vision in a brittle star is mediated by chromatophore movement in response to ambient light, *Current Biology,* 30(2), 319–327.e4.

Supa, M., Cotzin, M. ve Dallenbach, K. M. (1944) "Facial vision": The perception of obstacles by the blind, *The American Journal of Psychology,* 57(2), 133–183.

Suraci, J. P. ve diğ. (2019) Fear of humans as apex predators has landscape-scale impacts from mountain lions to mice, *Ecology Letters,* 22(10), 1578–1586.

Surlykke, A. ve diğ. (haz.), (2014) *Biosonar.* New York: Springer.

Surlykke, A. ve Kalko, E. K. V. (2008) Echolocating bats cry out loud to detect their prey, *PLOS One,* 3(4), e2036.

Surlykke, A., Simmons, J. A. ve Moss, C. F. (2016) Perceiving the world through echolocation and vision, *Bat bioacoustics* içinde, Fenton, M. B. ve diğ. (haz.), s. 265–288. New York: Springer.

Suter, R. B. (1978) *Cyclosa turbinata* (Araneae, Araneidae): Prey discrimination via web-borne vibrations, *Behavioral Ecology and Sociobiology,* 3(3), 283–296.

Suthers, R. A. (1967) Comparative echolocation by fishing bats, *Journal of Mammalogy,* 48(1), 79–87.

Sutton, G. P. ve diğ. (2016) Mechanosensory hairs in bumblebees (*Bombus terrestris*) detect weak electric fields, *Proceedings of the National Academy of Sciences,* 113(26), 7261–7265.

Swaddle, J. P. ve diğ. (2015) A framework to assess evolutionary responses to anthropogenic light and sound, *Trends in Ecology & Evolution,* 30(9), 550–560.

Takeshita, F. ve Murai, M. (2016) The vibrational signals that male fiddler crabs (*Uca lactea*) use to attract females into their burrows, *The Science of Nature,* 103, 49.

Tansley, K. (1965) *Vision in vertebrates.* Londra: Chapman and Hall.

Tautz, J. ve Markl, H. (1978) Caterpillars detect flying wasps by hairs sensitive to airborne vibration, *Behavioral Ecology and Sociobiology,* 4(1), 101–110.

Tautz, J. ve Rostás, M. (2008) Honeybee buzz attenuates plant damage by caterpillars, *Current Biology,* 18(24), R1125–R1126.

Taylor, C. J. ve Yack, J. E. (2019) Hearing in caterpillars of the monarch butterfly (*Danaus plexippus*), *Journal of Experimental Biology,* 222(22), jeb211862.

Tedore, C. ve Nilsson, D.-E. (2019) Avian UV vision enhances leaf surface contrasts in forest environments, *Nature Communications,* 10(1), 238.

Temple, S. ve diğ. (2012) High-resolution polarisation vision in a cuttlefish, *Current Biology,* 22(4), R121–R122.

Ter Hofstede, H. M. ve Ratcliffe, J. M. (2016) Evolutionary escalation: The bat-moth arms race, *Journal of Experimental Biology,* 219(11), 1589–1602.

Thaler, L. ve diğ. (2017) Mouth-clicks used by blind expert human echolocators—Signal description and model based signal synthesis, *PLOS Computational Biology,* 13(8), e1005670.

Thaler, L. ve diğ. (2020) The flexible action system: Click-based echolocation may replace certain visual functionality for adaptive walking, *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance,* 46(1), 21–35.

Thaler, L., Arnott, S. R. ve Goodale, M. A. (2011) Neural correlates of natural human echolocation in early and late blind echolocation experts, *PLOS One,* 6(5), e20162.

Thaler, L. ve Goodale, M. A. (2016) Echolocation in humans: An overview, *Wiley Interdisciplinary Reviews: Cognitive Science,* 7(6), 382–393.

Thoen, H. H. ve diğ. (2014) A different form of color vision in mantis shrimp, *Science,* 343(6169), 411–413.

Thoma, V. ve diğ. (2016) Functional dissociation in sweet taste receptor neurons between and within taste organs of *Drosophila, Nature Communications,* 7(1), 10678.

Thomas, K. N., Robison, B. H. ve Johnsen, S. (2017) Two eyes for two purposes: In situ evidence for asymmetric vision in the cockeyed squids *Histioteuthis heteropsis* and *Stigmatoteuthis dofleini, Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences,* 372(1717), 20160069.

Thometz, N. M. ve diğ. (2016) Trade-offs between energy maximization and parental care in a central place forager, the sea otter, *Behavioral Ecology,* 27(5), 1552–1566.

Thums, M. ve diğ. (2013) Evidence for behavioural thermoregulation by the world's largest fish, *Journal of the Royal Society Interface,* 10(78), 20120477.

Tierney, K. B. ve diğ. (2008) Salmon olfaction is impaired by an environmentally realistic pesticide mixture, *Environmental Science & Technology,* 42(13), 4996–5001.

Toda, Y. ve diğ. (2021) Early origin of sweet perception in the songbird radiation, *Science,* 373(6551), 226–231.

Tracey, W. D. (2017) Nociception, *Current Biology,* 27(4), R129–R133.

Treiber, C. D. ve diğ. (2012) Clusters of iron-rich cells in the upper beak of pigeons are macrophages not magnetosensitive neurons, *Nature,* 484(7394), 367–370.

Treisman, D. (2010) Ants and answers: A conversation with E. O. Wilson, *The New Yorker.* Erişim adresi: www.newyorker.com/books/page-turner/ants-and-answers-a-conversation-with-e-o-wilson.

Trible, W. ve diğ. (2017) *Orco* mutagenesis causes loss of antennal lobe glomeruli and impaired social behavior in ants, *Cell,* 170(4), 727–735.e10.

Tricas, T. C., Michael, S. W. ve Sisneros, J. A. (1995) Electrosensory optimization to conspecific phasic signals for mating, *Neuroscience Letters,* 202(1), 129–132.

Tsai, C.-C. ve diğ. (2020) Physical and behavioral adaptations to prevent overheating of the living wings of butterflies, *Nature Communications,* 11(1), 551.

Tsujii, K. ve diğ. (2018) Change in singing behavior of humpback whales caused by shipping noise, *PLOS One,* 13(10), e0204112.

Tumlinson, J. H. ve diğ. (1971) Identification of the trail pheromone of a leaf-cutting ant, *Atta texana, Nature,* 234(5328), 348–349.

Turkel, W. J. (2013) *Spark from the deep: How shocking experiments with strongly electric fish powered scientific discovery.* Baltimore: Johns Hopkins University Press.

Tuthill, J. C. ve Azim, E. (2018) Proprioception, *Current Biology,* 28(5), R194–R203.

Tuttle, M. D. ve Ryan, M. J. (1981) Bat predation and the evolution of frog vocalizations in the neotropics, *Science,* 214(4521), 677–678.

Tyack, P. L. (1997) Studying how cetaceans use sound to explore their environment, *Perspectives in ethology* içinde, Owings, D. H., Beecher, M. D. ve Thompson, N. S. (haz.), cilt 12, s. 251–297. New York: Plenum Press.

Tyack, P. L. ve Clark, C. W. (2000) Communication and acoustic behavior of dolphins and whales, *Hearing by whales and dolphins* içinde, Au, W. W. L., Fay, R. R. ve Popper, A. N. (haz.), s. 156–224. New York: Springer.

Tyler, N. J. C. ve diğ. (2014) Ultraviolet vision may enhance the ability of reindeer to discriminate plants in snow, *Arctic,* 67(2), 159–166.

Uexküll, J. von (1909) *Umwelt und Innenwelt der Tiere.* Berlin: J. Springer.

Uexküll, J. von (2010) *A foray into the worlds of animals and humans: With a theory of meaning*, çev. J. D. O'Neil, Minneapolis: University of Minnesota Press; Türkçesi: *İnsanların ve Hayvanların Dünyasında Gezintiler*, çev. Mehmet Göçmen, Çanakkale: Akademim Yayınları, 2013.

Ulanovsky, N. ve Moss, C. F. (2008) What the bat's voice tells the bat's brain, *Proceedings of the National Academy of Sciences,* 105(25), 8491–8498.

Ullrich-Luter, E. M. ve diğ. (2011) Unique system of photoreceptors in sea urchin tube feet, *Proceedings of the National Academy of Sciences,* 108(20), 8367–8372.

Vaknin, Y. ve diğ. (2000) The role of electrostatic forces in pollination, *Plant Systematics and Evolution,* 222(1), 133–142.

Van Buskirk, R. W. ve Nevitt, G. A. (2008) The influence of developmental environment on the evolution of olfactory foraging behaviour in procellariiform seabirds, *Journal of Evolutionary Biology,* 21(1), 67–76.

Van der Horst, G. ve diğ. (2011) Sperm structure and motility in the eusocial naked mole-rat, *Heterocephalus glaber:* A case of degenerative orthogenesis in the absence of sperm competition?, *BMC Evolutionary Biology,* 11(1), 351.

Van Doren, B. M. ve diğ. (2017) High-intensity urban light installation dramatically alters nocturnal bird migration, *Proceedings of the National Academy of Sciences,* 114(42), 11175–11180.

Van Lenteren, J. C. ve diğ. (2007) Structure and electrophysiological responses of gustatory organs on the ovipositor of the parasitoid *Leptopilina heterotoma, Arthropod Structure & Development,* 36(3), 271–276.

Van Staaden, M. J. ve diğ. (2003) Serial hearing organs in the atympanate grasshopper *Bullacris membracioides* (Orthoptera, Pneumoridae), *Journal of Comparative Neurology,* 465(4), 579–592.

Veilleux, C. C. ve Kirk, E. C. (2014) Visual acuity in mammals: Effects of eye size and ecology, *Brain, Behavior and Evolution,* 83(1), 43–53.

Vélez, A., Ryoo, D. Y. ve Carlson, B. A. (2018) Sensory specializations of mormyrid fish are associated with species differences in electric signal localization behavior, *Brain, Behavior and Evolution,* 92(3–4), 125–141.

Vernaleo, B. A. ve Dooling, R. J. (2011) Relative salience of envelope and fine structure cues in zebra finch song, *Journal of the Acoustical Society of America,* 129(5), 3373–3383.

Vidal-Gadea, A. ve diğ. (2015) Magnetosensitive neurons mediate geomagnetic orientation in *Caenorhabditis elegans, eLife,* 4, e07493.

Viguier, C. (1882) Le sens de l'orientation et ses organes chez les animaux et chez l'homme, *Revue philosophique de la France et de l'étranger,* 14, 1–36.

Viitala, J. ve diğ. (1995) Attraction of kestrels to vole scent marks visible in ultraviolet light, *Nature,* 373(6513), 425–427.

Vogt, R. G. ve Riddiford, L. M. (1981) Pheromone binding and inactivation by moth antennae, *Nature,* 293(5828), 161–163.

Vollrath, F. (1979a) Behaviour of the kleptoparasitic spider *Argyrodes elevatus* (Araneae, theridiidae), *Animal Behaviour,* 27(Pt 2), 515–521.

Vollrath, F. (1979b) Vibrations: Their signal function for a spider kleptoparasite, *Science,* 205(4411), 1149–1151.

Von der Emde, G. (1990) Discrimination of objects through electrolocation in the weakly electric fish, *Gnathonemus petersii, Journal of Comparative Physiology A,* 167, 413–421.

Von der Emde, G. (1999) Active electrolocation of objects in weakly electric fish, *Journal of Experimental Biology,* 202, 1205–1215.

Von der Emde, G. ve diğ. (1998) Electric fish measure distance in the dark, *Nature,* 395(6705), 890–894.

Von der Emde, G. ve Ruhl, T. (2016) Matched filtering in African weakly electric fish: Two senses with complementary filters, *The ecology of animal senses* içinde, von der Emde, G. ve Warrant, E. (haz.), 237–263. Cham: Springer.

Von der Emde, G. ve Schnitzler, H.-U. (1990) Classification of insects by echolocating greater horseshoe bats, *Journal of Comparative Physiology A,* 167(3), 423–430.

Von Dürckheim, K. E. M. ve diğ. (2018) African elephants (*Loxodonta africana*) display remarkable olfactory acuity in human scent matching to sample performance, *Applied Animal Behaviour Science,* 200, 123–129.

Von Holst, E. ve Mittelstaedt, H. (1950) Das reafferenzprinzip, *Naturwissenschaften,* 37(20), 464–476.

Wackermannová, M., Pinc, L. ve Jebavý, L. (2016) Olfactory sensitivity in mammalian species, *Physiological Research,* 65(3), 369–390.

Walker, D. B. ve diğ. (2006) Naturalistic quantification of canine olfactory sensitivity, *Applied Animal Behaviour Science,* 97(2–4), 241–254.

Walsh, C. M., Bautista, D. M. ve Lumpkin, E. A. (2015) Mammalian touch catches up, *Current Opinion in Neurobiology,* 34, 133–139.

Wang, C. X. ve diğ. (2019) Transduction of the geomagnetic field as evidenced from alpha-band activity in the human brain, *eNeuro,* 6(2), ENEURO.0483-18.2019.

Ward, J. (2013) Synesthesia, *Annual Review of Psychology,* 64(1), 49–75.

Wardill, T. ve diğ. (2013) The miniature dipteran killer fly *Coenosia attenuata* exhibits adaptable aerial prey capture strategies, *Frontiers of Physiology Conference Abstract: International Conference on Invertebrate Vision,* doi:10.3389/conf.fphys.2013.25.00057.

Ware, H. E. ve diğ. (2015) A phantom road experiment reveals traffic noise is an invisible source of habitat degradation, *Proceedings of the National Academy of Sciences,* 112(39), 12105–12109.

Warkentin, K. M. (1995) Adaptive plasticity in hatching age: A response to predation risk trade-offs, *Proceedings of the National Academy of Sciences,* 92(8), 3507–3510.

Warkentin, K. M. (2005) How do embryos assess risk? Vibrational cues in predator-induced hatching of red-eyed treefrogs, *Animal Behaviour,* 70(1), 59–71.

Warkentin, K. M. (2011) Environmentally cued hatching across taxa: Embryos respond to risk and opportunity, *Integrative and Comparative Biology,* 51(1), 14–25.

Warrant, E. J. (2017) The remarkable visual capacities of nocturnal insects: Vision at the limits with small eyes and tiny brains, *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences,* 372(1717), 20160063.

Warrant, E. J. ve diğ. (2004) Nocturnal vision and landmark orientation in a tropical halictid bee, *Current Biology,* 14(15), 1309–1318.

Warrant, E. ve diğ. (2016) The Australian bogong moth *Agrotis infusa:* A long-distance nocturnal navigator, *Frontiers in Behavioral Neuroscience,* 10, 77.

Warrant, E. J. ve Locket, N. A. (2004) Vision in the deep sea, *Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society,* 79(3), 671–712.

Watanabe, T. (1999) The influence of energetic state on the form of stabilimentum built by *Octonoba sybotides* (Araneae: Uloboridae), *Ethology,* 105(8), 719–725.

Watanabe, T. (2000) Web tuning of an orb-web spider, *Octonoba sybotides,* regulates prey-catching behaviour, *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences,* 267(1443), 565–569.

Webb, B. (1996) A cricket robot, *Scientific American.* Erişim adresi: www.scientificamerican.com/article/a-cricket-robot/.

Webb, J. F. (2013) Morphological diversity, development, and evolution of the mechanosensory lateral line system, *The lateral line system* içinde, Coombs, S. ve diğ. (haz.), s. 17–72. New York: Springer.

Webster, D. B. (1962) A function of the enlarged middle-ear cavities of the kangaroo rat, *Dipodomys, Physiological Zoology,* 35(3), 248–255.

Webster, D. B. ve Webster, M. (1971) Adaptive value of hearing and vision in kangaroo rat predator avoidance, *Brain, Behavior and Evolution,* 4(4), 310–322.

Webster, D. B. ve Webster, M. (1980) Morphological adaptations of the ear in the rodent family heteromyidae, *American Zoologist,* 20(1), 247–254.

Weger, M. ve Wagner, H. (2016) Morphological variations of leading-edge serrations in owls (*Strigiformes*), *PLOS One,* 11(3), e0149236.

Wehner, R. (1987) "Matched filters"—Neural models of the external world, *Journal of Comparative Physiology A,* 161(4), 511–531.

Weiss, T. ve diğ. (2020) Human olfaction without apparent olfactory bulbs, *Neuron,* 105(1), 35–45.e5.

Wenzel, B. M. ve Sieck, M. H. (1972) Olfactory perception and bulbar electrical activity in several avian species, *Physiology & Behavior,* 9(3), 287–293.

Wheeler, W. M. (1910) *Ants: Their structure, development and behavior.* New York: Columbia University Press.

Widder, E. (2019) The Medusa, NOAA Ocean Exploration. Erişim adresi: oceanexplorer.noaa.gov/explorations/19biolum/background/medusa/medusa.html.

Wieskotten, S. ve diğ. (2010) Hydrodynamic determination of the moving direction of an artificial fin by a harbour seal (*Phoca vitulina*), *Journal of Experimental Biology,* 213(13), 2194–2200.

Wieskotten, S. ve diğ. (2011) Hydrodynamic discrimination of wakes caused by objects of different size or shape in a harbour seal (*Phoca vitulina*), *Journal of Experimental Biology,* 214(11), 1922–1930.

Wignall, A. E. ve Taylor, P. W. (2011) Assassin bug uses aggressive mimicry to lure spider prey, *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences,* 278(1710), 1427–1433.

Wilcox, C., Van Sebille, E. ve Hardesty, B. D. (2015) Threat of plastic pollution to seabirds is global, pervasive, and increasing, *Proceedings of the National Academy of Sciences,* 112(38), 11899–11904.

Wilcox, S. R., Jackson, R. R. ve Gentile, K. (1996) Spiderweb smokescreens: Spider trick- ster uses background noise to mask stalking movements, *Animal Behaviour,* 51(2), 313–326.

Williams, C. J. ve diğ. (2019) Analgesia for non-mammalian vertebrates, *Current Opinion in Physiology,* 11, 75–84.

Wilson, D. R. ve Hare, J. F. (2004) Ground squirrel uses ultrasonic alarms, *Nature,* 430(6999), 523.

Wilson, E. O. (2015) Pheromones and other stimuli we humans don't get, with E. O.

Wilson, *Big Think.* Erişim adresi: bigthink.com/videos/eo-wilson-on-the-world-of-pheromones.

Wilson, E. O., Durlach, N. I. ve Roth, L. M. (1958) Chemical releasers of necrophoric behavior in ants, *Psyche,* 65(4), 108–114.

Wilson, S. ve Moore, C. (2015) S1 somatotopic maps, *Scholarpedia,* 10(4), 8574.

Wiltschko, R. ve Wiltschko, W. (2013) The magnetite-based receptors in the beak of birds and their role in avian navigation, *Journal of Comparative Physiology A,* 199(2), 89–98. Wiltschko, R., and Wiltschko, W. (2019) Magnetoreception in birds, *Journal of the Royal Society Interface,* 16(158), 20190295.

Wiltschko, W. (1968) Über den Einfluß statischer Magnetfelder auf die Zugorientierung der Rotkehlchen (*Erithacus rubecula*), *Zeitschrift für Tierpsychologie,* 25(5), 537–558.

Wiltschko, W. ve diğ. (2002) Lateralization of magnetic compass orientation in a migratory bird, *Nature,* 419(6906), 467–470.

Wiltschko, W. ve Merkel, F. W. (1965) Orientierung zugunruhiger Rotkehlchen im statischen Magnetfeld, *Verhandlungen der Deutschen Zoologischen Gesellschaft in Jena,* 59, 362ß– 367.

Windsor, D. A. (1998) Controversies in parasitology: Most of the species on Earth are parasites, *International Journal for Parasitology,* 28(12), 1939–1941.

Winklhofer, M. ve Mouritsen, H. (2016) A room-temperature ferrimagnet made of metalloproteins?, bioRxiv, 094607.

Wisby, W. J. ve Hasler, A. D. (1954) Effect of olfactory occlusion on migrating silver salmon (*O. kisutch*), *Journal of the Fisheries Research Board of Canada,* 11(4), 472–478.

Witherington, B. ve Martin, R. E. (2003) Understanding, assessing, and resolving light-pollution problems on sea turtle nesting beaches, Florida Marine Research Institute Technical Report TR-2.

Witte, F. ve diğ. (2013) Cichlid species diversity in naturally and anthropogenically turbid habitats of Lake Victoria, East Africa, *Aquatic Sciences,* 75(2), 169–183.

Woith, H. ve diğ. (2018) Review: Can animals predict earthquakes?, *Bulletin of the Seismological Society of America,* 108(3A), 1031–1045.

Wolff, G. H. ve Riffell, J. A. (2018) Olfaction, experience and neural mechanisms underlying mosquito host preference, *Journal of Experimental Biology,* 221(4), jeb157131.

Wu, C. H. (1984) Electric fish and the discovery of animal electricity, *American Scientist,* 72(6), 598–607.

Wu, L.-Q. ve Dickman, J. D. (2012) Neural correlates of a magnetic sense, *Science,* 336(6084), 1054–1057.

Wueringer, B. E. (2012) Electroreception in elasmobranchs: Sawfish as a case study, *Brain, Behavior and Evolution,* 80(2), 97–107.

Wueringer, B. E., Squire, L. ve diğ. (2012a) Electric field detection in sawfish and shovelnose rays, *PLOS One,* 7(7), e41605.

Wueringer, B. E., Squire, L. ve diğ. (2012b) The function of the sawfish's saw, *Current Biology,* 22(5), R150–R151.

Wurtsbaugh, W. A. ve Neverman, D. (1988) Post-feeding thermotaxis and daily vertical migration in a larval fish, *Nature,* 333(6176), 846–848.

Wyatt, T. (2015a) How animals communicate via pheromones, *American Scientist,* 103(2), 114.

Wyatt, T. D. (2015b) The search for human pheromones: The lost decades and the necessity of returning to first principles, *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences,* 282(1804), 20142994.

Wynn, J. ve diğ (2020) Natal imprinting to the Earth's magnetic field in a pelagic seabird, *Current Biology,* 30(14), 2869–2873.e2.

Yadav, C. (2017) Invitation by vibration: Recruitment to feeding shelters in social caterpillars, *Behavioral Ecology and Sociobiology,* 71(3), 51.

Yager, D. D. ve Hoy, R. R. (1986) The cyclopean ear: A new sense for the praying mantis, *Science,* 231(4739), 727–729.

Yanagawa, A., Guigue, A. M. A. ve Marion-Poll, F. (2014) Hygienic grooming is induced by contact chemicals in *Drosophila melanogaster, Frontiers in Behavioral Neuroscience,* 8, 254.

Yarmolinsky, D. A., Zuker, C. S. ve Ryba, N. J. P. (2009) Common sense about taste: From mammals to insects, *Cell,* 139(2), 234–244.

Yeates, L. C., Williams, T. M. ve Fink, T. L. (2007) Diving and foraging energetics of the smallest marine mammal, the sea otter (*Enhydra lutris*), *Journal of Experimental Biology,* 210(11), 1960–1970.

Yong, E. (2020) America is trapped in a pandemic spiral, *The Atlantic.* Erişim adresi: www.the atlantic.com/health/archive/2020/09/pandemic-intuition-nightmare-spiral-winter/616204/.

Yoshizawa, M. ve diğ. (2014) The sensitivity of lateral line receptors and their role in the behavior of Mexican blind cavefish (*Astyanax mexicanus*), *Journal of Experimental Biology,* 217(6), 886–895.

Yovel, Y. ve diğ. (2009) The voice of bats: How greater mouse-eared bats recognize individuals based on their echolocation calls, *PLOS Computational Biology,* 5(6), e1000400.

Zagaeski, M. ve Moss, C. F. (1994) Target surface texture discrimination by the echolocating bat, *Eptesicus fuscus, Journal of the Acoustical Society of America,* 95(5), 2881–2882.

Zapka, M. ve diğ. (2009) Visual but not trigeminal mediation of magnetic compass information in a migratory bird, *Nature,* 461(7268), 1274–1277.

Zelenitsky, D. K., Therrien, F. ve Kobayashi, Y. (2009) Olfactory acuity in theropods: Palaeobiological and evolutionary implications, *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences,* 276(1657), 667–673.

Zimmer, C. (2012) Monet's ultraviolet eye, *Download the Universe.* Erişim adresi: www.downloadtheuniverse.com/dtu/2012/04/monets-ultraviolet-eye.html.

Zimmerman, A., Bai, L. ve Ginty, D. D. (2014) The gentle touch receptors of mammalian skin, *Science,* 346(6212), 950–954.

Zimmermann, M. J. Y. ve diğ. (2018) Zebrafish differentially process color across visual space to match natural scenes, *Current Biology,* 28(13), 2018–2032.e5.

Zions, M. ve diğ. (2020) Nest carbon dioxide masks GABA-dependent seizure susceptibility in the naked mole-rat, *Current Biology,* 30(11), 2068–2077.e4.

Zippelius, H.-M. (1974) Ultraschall-Laute nestjunger Mäuse, *Behaviour,* 49(3–4), 197–204.

Zuk, M., Rotenberry, J. T. ve Tinghitella, R. M. (2006) Silent night: Adaptive disappearance of a sexual signal in a parasitized population of field crickets, *Biology Letters,* 2(4), 521–524.

Zullo, L. ve diğ. (2009) Nonsomatotopic organization of the higher motor centers in octopus, *Current Biology,* 19(19), 1632–1636.

Zupanc, G. K. H. ve Bullock, T. H. (2005) From electrogenesis to electroreception: An overview, *Electroreception* içinde, Bullock, T. H. ve diğ. (haz.), s. 5–46. New York: Springer.

Görsel Referansları

GÖRSELLER 1

Sayfa 1: üstte (köpek burnu): Gunn Shots !; altta (karıncalar): Daniel Kronauer

Sayfa 2: üstte (filler): sheilapic76; ortada (albatros): Seabird NZ; altta (yılan): Lisa Zins

Sayfa 3: üstte (kelebek): Jaguar Tambako; altta (yayınbalığı): Mathias Appel

Sayfa 4: üstte (sıçrayan örümcek): Artur Rydzewski; altta (sinek): janetgraham84

Sayfa 5: üstte (deniztarağı gözleri): Sonke Johnsen; altta (yılanyıldızı): *Ophiocoma wendtii* (Müller ve Troschel, 1842), Kent Miller'ın Puerto Rico'daki gözlemi.

Sayfa 6: üstte (mayıssineği): treegrow; ortada (bukalemun): VVillamon; altta (*Streetsia*): E. A. Lazo-Wasem, Yale Peabody Museum

Sayfa 7: üstte (ter arısı): Eric Warrant; altta (atmaca güvesi): Nick Goodrum Photography

Sayfa 8: Ed Yong; alttaki fotoğraf, András Péter tarafından Dog Vision Tool kullanılarak oluşturulmuştur.

Sayfa 9: üstte (rudbekya): Adrian Davies / Alamy Stock Photo; altta (damsel balığı): Ulrike Siebeck

Sayfa 10: üstte (sinekkuşu): Larry Lamsa; altta (kelebekler): berniedup

Sayfa 11: üstte ve altta (mantis karidesi ve gözü): prilfish

Sayfa 12: üstte (çıplak kör fare): John Brighenti; altta (yer sincabı): Ed Yong

Sayfa 13: üstte (kınkanatlı): Helmut Schmitz; ortada (yarasa): Acatenazzi, İngilizce Wikipedia; altta (çıngıraklıyılan): bamyers4az

Sayfa 14: üstte (deniz samuru): Colleen Reichmuth; altta (büyük kumkuşları): ABD Balık ve Yaban Hayatı Hizmetleri (USFWS)—Kuzeydoğu Bölgesi

Sayfa 15: üstte (yıldız burunlu köstebek): gordonramsaysubmissions; ortada (mücevher eşekarısı): Ken Catania; sol altta (bıyıklı alklet): USFWS Merkezi; sağ altta (fare): JohannPiber

Sayfa 16: üstte (manati): USFWS Endangered Species; altta (timsah): Justin-Jensen

GÖRSELLER 2

Sayfa 1: üstte (liman foku): Colleen Reichmuth; altta (liman foku): Ed Yong
Sayfa 2: üstte (tavus kuşu): onecog2many; altta (kaplan gezgin örümceği): Hakan Soderholm / Alamy Stock Photo
Sayfa 3: (ağaçpireleri): USGS Bee Inventory and Monitoring Lab
Sayfa 4: üstte (akrep): Xbuzzi; ortada (altın köstebekler): Galen Rathbun, California Academy of Sciences'ın izniyle; altta (yılan): Karen Warkentin
Sayfa 5: üstte (*Nephila* örümceği): srikaanth.srikar; altta (*Argyrodes* örümceği): spiderman (Frank)
Sayfa 6: üstte (peçeli baykuş): AHisgett; altta (sinek): treegrow
Sayfa 7: üstte (kurbağa): brian.gratwicke; altta (ispinoz): archer10 (Dennis)
Sayfa 8: üstte (balina): greyloch; altta (fil): Kumaravel
Sayfa 9: üstte (tarsiyer): berniedup; ortada (mum güvesi): Andy Reago ve Chrissy McClarren; altta (sinekkuşu): Bettina Arrigoni
Sayfa 10: (yarasa): Jesse Barber
Sayfa 11: (yunuslar): J. D. Ebberly
Sayfa 12: üstte (kara hayalet bıçakbalığı): blickwinkel / Alamy Stock Photo; orta sağda (elektrikli yılanbalığı): chrisbb@prodigy.net; orta solda (cam bıçakbalığı): Charles & Clint; altta (filbalığı): Imagebroker / Alamy Stock Photo
Sayfa 13: üstte (köpekbalığındaki ampuller): Albert kok; ortada (testerebalığı): Simon Fraser University; altta (çekiçkafalı köpekbalığı): Numinosity, Gary J. Wood
Sayfa 14: üstte (ornitorenk): Klaus; altta (bombus arısı): wwarby
Sayfa 15: üstte (güve): CSIRO; ortada (kızılgerdan): tallpomlin; altta (kaplumbağa): Dionysisa303
Sayfa 16: (ahtapot): Joe Parks

Dizin

ABD Donanması
  Ses Gözetleme Sistemi (SOSUS), 237, 238, 239
  ve yunuslar, 269
acı/ağrı
  balıklarda, 127-129, 133
  böceklerde, 132-133, *136n*
  çalışmanın ahlaki ve etik olması, 127, 135
  hayvanlarda saptayabilme, 125
  hayvanların acı hissetmesi, 129-135, 136
  insanda, 124, 134
  istenmeyen duyu olarak, 127
  kafadanbacaklılarda, 133-135, 136-138
  kalamar, 133-134
  memelilerde lokalize edilebilmesi, 134
  öznel ve değişken olması, 123
  ve beyin, 123-124, 129
  ve bilinç, 125, 132, 133, 136
  ve evrim, 132
  ve hayatta kalma, 123, 124
  ve nosisepsiyon, 121-125, 127
  ve tehlike, 131, 132
  yengeçlerde, 130
acımsılık
  tadı saptayabilme, 51
  toksinlere karşı uyarı, 47, 49-51
Ackerman, Diane, 24
Adamo, Shelly, 131, 132-133
afalina (şişe burunlu yunus), 269
Afrika fili
  koku duyusu, 32-34, 35-36
ağaç cırcırböceği, 190-192
ağaçpireleri, 12, 197-200
ağızla yoklama, 175
ahtapot
  dokunma ve tat duyularının birleşmesi, 341
  fotoreseptörler, 58-59
  görme keskinliği, 64
  insan tarafından tam olarak bilinememesi, 340-341, 343-345
  kollar, 341-342, 343
  merkezî sinir sistemi, 341-342
  "saf olasılıktan müteşekkil beden", 343
  ve acı/ağrı, 134-135
akbabalar, 37-38, 70-71
aktif elektrolokasyon, 287-289
  Ayrıca bkz. elektrikli balık
alabalık, 127-128
alligator, 184-185
altın köstebek, 205-206
Ambon damsel balığı, 97
Amerika maymunları, 92-94
aminoasitler, 49
Anma Işıkları (New York), 349-350

antenle dokunma, 29
Antroposen, 347
Appel, Mirjam, 130-131
arılar
duyu sistemlerinin yakınsaması, 335
elektroreseptörler, 305-306
gece görüşü, 78-81
renkli görme, 97
UV görüş, 96
Arikawa, Kentaro, 11, 92, 105-106
Aristoteles
duyu sayısı, 8
içsel duyuların ihmâli, 336
insanın dokunma duyusu, 16
koku duyusu, 24
yılanların çatal dili, 42
armadillo
görme, 89
asalak eşekarısı
reseptör olarak iğnesi, 48
asalaklar ve ısı, 150-151
asit ve çıplak kör fare, 121, 122
aslan
görme keskinliği, 63
Asya kırlangıçkuyruğu
fotoreseptörleri, 59
at
renkli görme, 90
atsineği ve zebra, 63
Au, Whitlow, 269, 272, 275
Audubon, John James, 37
avcı sinekler,
görme keskinliği, 65
avcı-toplayıcı halklar ve koku duyusu, 24
avlanma
av olarak kelebekler, 101-102
av olarak kurbağalar, 119
balinalarda, 240-241
böceklerde, 228
elektrikli yılanbalığında, 285
filbalığında, 338
köpekbalıklarında, 300-301
mavi balinada, 240-241
ornitorenkte, 335
örümceklerde, 53-54
renkli görme ve avcı-av ilişkisi, 119
sıçrayan örümceklerde, 54
sivrisineklerde, 331-342, 333
vatozlarda, 300, 301-302
ve elektroresepsiyon, 292
ve görme, 219
ve işitme, 219, 222, 223
ve koku, 219
ve pasif elektroresepsiyon, 300-301
ve titreşimler, 204-205, 206
yarasalarda, 228, 250-251, 258-259, 265-266, 267
yılanlarda, 156
yunuslarda, 274, 275
yusufçuklarda, 76
Axel, Richard, 26-28
ay güvesi, 266-267

Bagriantsev, Slav, 170
Baker, Robin, 327
Bakken, George 154, 156, 157, 158
balarısı
CFF, 77
Baldwin, Maude, 51-52
balıklar
acı/ağrı, 127-129, 133
çıkardıkları sesler, 293
çoklu duyu, 334
elektrikli, 284-285, 287-289, 302, 335
elektrolokasyon, 303-304
insan kaynaklı gürültü kirliliği, 358
işitme frekansı, 273
işitme ve çiftleşme, 235
manyetik algılama, 315
mekanoreseptörler, 172
tür çeşitliliği, 359-360
UV şeritler, 97

ve sessiz Büyük Set Resifi, 361-362
Victoria Gölü, 359-360
yanal çizgi, 181-183, 337
balinalar
ana gruplar, 269-270
ekolokasyon, 273-274
evrim, 240
göç, 315-316
gözler, 73, 89
insan kaynaklı gürültü kirliliği, 357, 358
işitme aralığı, 243-244
manyetik alanlardan rahatsız olmaları, 315-316
ses çıkarma, 237, 238-239, 244, 271-272
yiyecek arama, 240-241
Bálint, Anna, 159
Bang, Betsy, 38, 39
Barber, Jesse
güve araştırmaları, 265-267
insan kaynaklı kirlilik araştırmaları, 347, 348, 356
yarasa araştırmaları, 248, 249, 250-251, 346, 347
Barth, Friedrich, 189, 192, 212
"basitlik filtreleri", 10
Basolo, Alexandra, 227
Başka Zihinler (Godfrey-Smith), 343
Bates, Lucy, 32-34, 35-36
Bates, Tim, 39-40
Bauer, Gordon, 174-178
baykuşlar
çoklu duyu, 334
ekolokasyon, 277
insan kaynaklı gürültü kirliliği, 356
işitme, 215-216, 217-218
Bedore, Christine, 301
Being a Dog (Horowitz), 23
benekli bülbül, 319
Benoit-Bird, Kelly, 275
Bernal, Ximena, 228
Beston, Henry, 5
beyin
acı/ağrı, 123-124, 129
ahtapotta, 341, 342-343
bilinç, 129-130
duyuları kontrol eden bölgeler, 47
elektrik, 304
filbalığında, 296
görsel imgeleri işleme, 76-77
insanda ekolokasyon, 281-285
insanda vücut ağırlığı ve oksijen kullanımı yüzdesi, 296
vücut haritaları, 342
kuşlarda, 72-73, 324
mantis karidesinin renkli görmesi, 111
renkli görme, 88, 119
somatosensoriyel korteks, 161, 166-167
yarasalarda, 256
bıçakbalığı, 286-290, 293, 294, 303-304
bıyık ve bıyık oynatma
çıplak kör farede, 176
damanda, 176
farede, 2, 173-174
foklarda, 178
insandaki görmeyle karşılaştırılması, 173-174
liman fokunda, 178, 179
manatide, 175-176, 177
ve evrim, 174
"bilgiye dayalı hayalî sıçrama", 11
bilinç
acı/ağrı, 125, 132, 133, 136
hayal edebilme, diğer hayvanların deneyimleri, 9, 253-254
sinir sistemi, 129-130, 339
Bird Sense (Birkhead), 169-170
Birkhead, Tim, 169-170
biyolüminesans, 82-84

Bogong güvesi, 311, 334
bombus arısı, 305-306, 335
böcekler
avlanma, 228
beyaz ışığın etkisi, 348
çoklu duyu organları, 335
çoklu duyu, 334
dokunma reseptörleri, 171-172
evrim, 172
gözler, 56-57
insan kaynaklı ışık kirliliği, 347-348, 352
işitme, 192, 247-248
kırmızı ışığın etkisi, 352
kulaklar, 221, 222, 223-224
manyetik alanlar, 314
mavi ışığın etkisi, 352
tat reseptörleri, 48-49
ve acı/ağrı, 132-133, 136
ve polarize ışık, 115
ve titreşimler, 2-3, 12, 196, 198-204
Braithwaite, Victoria, 127-128
Branstetter, Brian, 271
Briscoe, Adriana, 101
Broca, Paul, 23
Broom, Donald, 126, 127
Brownell, Philip, 202-203
Brumm, Henrik, 355
Bryant, Astra, 149, 150
Buck, Linda, 26-28
bukalemun, 73-74
Bullock, Ted, 294
Buxton, Rachel, 355
büyük kahverengi yarasa
avlanma, 258, 259, 266
ekolokasyon, 256, 257, 258
işitme, 255
manyetik algılama, 315
Büyük Set Resifi, 361-362

Caldwell, Michael, 195
cam bıçakbalığı, 293, 294
Caprio, John
yayınbalığının tat duyusu, 46-47, 49
Caputi, Angel, 291
Caretta Caretta, 317-318
Carlson, Bruce, 291, 294, 295, 296, 297, 303, 338
Caro, Tim, 62-63
Carr, Ann, 152
Carr, Archie, 317
Casas, Jerome, 190, 192
Catania, Ken
araştırma araçları, 366
elektrikli yılanbalığı, 285
hayvanlarda dokunma duyarlılığı, 165, 185
solucanlar ve titreşimler, 204-205
yıldız burunlu köstebeğin dokunma sensörleri, 166-167, 168, 169
yıldız burunlu köstebeğin elektroreseptörleri, 302
Caves, Eleanor, 63, 64
Chatigny, Frederic, 136
Chernetsov, Nikita, 319
Chiou, Tsyr-Huei, 115
Chittka, Lars, 119
cırcırböceği, 190-192, 223, 224
cinsel seçilim ve evrim, 296
Cinzano, Pierantonio, 348-349
Clark, Chris, 238-242, 244, 366
Clark, Rulon, 43, 153, 158, 220
Cocroft, Rex
araştırma araçları, 201, 366
böcek titreşimleri, 12, 197-200, 201-202
ve müzik, 210
ve Ryan, 11, 225
Cole, Hunter, 346-347, 348, 349
Coombs, Sheryl, 182
Corcoran, Aaron, 265-266
COVID-19, 362-363

Cronin, Tom, 108, 112, 114, 117
Cronon, William, 364-365
Crook, Robyn
  acı/ağrı, 124, 125, 127, 133
  ahtapotun merkezî sinir sistemi, 341
  bilinç ve hayvanların sinir sistemi, 130
Cummings, Molly, 96-97, 119
Cunningham, Susan, 171
Cuthill, Innes, 97

çalı kargası, 360-361
çalı tavuğu, 356
çapraz modal nesne tanıma, 335
çayır köpeği, 356
çeçe sineği ve zebra, 63
çıngıraklıyılan
  avlanma, 156
  ısı sensörleri, 154
  ısı ve avlanma, 158
  koku duyusu, 43-44, 45
çıplak kör fare
  asit, kapsaisin ve karbondioksite tepki verememesi, 121, 122
  dokunma duyusu, 161, 176
  temel gerçekler, 120-121
çiftleşme
  balıklarda, 235, 295
  güvelerde, 248
  kurbağalarda, 225-228
  mormirinde, 296
  ve işitme, 234-235
  ve titreşimler, 195-196, 200, 208
çiklit balığı, 359-360
çilek zehirli ok kurbağası, 119
çita
  görme keskinliği, 64
çukur engerekleri, 154-155, 156-158

d'Aguilon, François, 337-348
d'Ettorre, Patrizia, 31
dağıtılmış görme, 68-70
dairesel polarizasyon, 115-118
daman (kırsıçanı), 176
damsel balığı, 97, 358
Daniel Kronauer, 331-332
Darwin, Charles
  elektrikli balık, 286
  koku duyusu, 24
  modern karmaşık gözün evrimi, 60
  solucanlar ve titreşimler, 205
DEET, 332
Dehnhardt, Guido, 178, 179
denge duyusu, 8, 336
deniz kaplumbağası
  göç, 316-318
deniz samuru, 159-163
denizanası
  gözler, 60
denizkestanesi
  görme, 69
deniztarağı
  gözler, 66-68, 77
  koku duyusu, 67, 68
denizyıldızı
  gözler, 60-62
deprem
  hayvanların hissetmesi, 203
derin deniz hayvanları
  gözler, 56, 74, 83-84
  insan yapımı ışığın etkileri, 82
derinlik algısı, 71
Derryberry, Elizabeth, 363
Descartes, Réne, 125
dev kalamar
  gözler, 56, 83-84
  insanlar tarafından ilk kez görülmesi, 84
Di Silvestro, Roger, 190
Dickman, David, 322
Dijkgraff, Sven, 181-182, 252, 291, 299
dikenli ıstakoz, 318-319

dikromasi, 90-91, 92-93
dil ve duyusal dünya, 9
dinozorlar
  dokunma duyusu, 172-173, 185-186
  görme, 100
  koku duyusu, 38
dişli balinalar, 269-270, 272, 274-275
  Ayrıca bkz. belli türler
dişli balinalar, 270
dişsiz balinalar
  işitme aralığı, 243-244
Do Fish Feel Pain? (Braithwaite), 127-128
doğa koruma girişimleri, 361-362, 363-364
"doğduğu yere dönme", 319
dokunma duyusu
  ahtapotta, 341
  alligatorda, 184-185
  balıklarda, 181-183
  beynin ilgili bölgesi, 161
  cırcırböceğinde, 190-192
  dinozorlarda, 185-186
  duyarlılığı, 164-165
  ekolokasyon, 282
  elektrolokasyon, 291
  hayvanların dokunmaya en duyarlı bölgeleri, 161-162
  insanda işlenmesi, 342
  kaplan gezgin örümceğinde, 188-189
  kuşlarda, 186-187
  liman fokunda, 178-180
  manatide ağız diski, 175-176
  mücevher eşekarısında, 171-172
  örümceklerde, 190-192
  "uzaktan dokunma", 171
  ve hareket, 165
  ve mesafe, 163, 177, 178-180, 181-183
  ve titreşimler, 164, 165, 166
  yılanlarda, 185
  yıldız burunlu köstebekte, 166-167
  Ayrıca bkz. mekanoreseptörler
dokunma organları. *Bkz.* mekanoreseptörler; dokunma duyusu; bıyık ve bıyık oynatma
Donaldson, Henry, 141
Dooling, Robert, 230-231, 243
Doppler etkisi, 264-265
dönücü yunus, 275
dört gözlü balık, 74
Dunning, Dorothy, 266
Duranton, Charlotte, 20
duyu organları
  bütünün parçası olarak, 339-340
  eksaferenz ve reaferenz, 336-339
  tanımı, 6
  Ayrıca bkz. duyu sistemleri; belli organlar/reseptörler
duyu sistemleri
  enformasyonun birleştirilmesi ve çapraz kontrolü, 330, 331-335
  hayvan bedeniyle ilişkisi, 290-291
  her an hazır olma, 6-7
  içe dönük, 336
  insanın hayvanları anlamadaki yanlılığı, 9, 328
  sayısı, 8
  tanımı, 6
  uyaran filtresi olarak, 7
  ve öznellik, 9
  yakınsaması, 335
duyusal istifade, 227
Dünya'nın elektrik alanları, 304-307

Eimer organı, 166, 167
Eisemann, Craig, 136
ekidna, 303, 304
ekolokasyon
  akustik etiket, 274
  balinalarda, 274
  baykuşlarda, 277
  çağrının yüksekliği, 255
  dişli balinalarda, 270

frekans değişimleri, 258
insanda, 275-276, 277-282
kurgu karakterler, 277-278
sesle dokunma ve görme, 270, 273, 278-281, 282
terimin üretilmesi, 287
ve evrim, 248, 254
ve mesafe, 272-273, 274-275
yarasalarda, 248, 251-260, 264-265, 267
yunuslarda, 269, 270, 272-273
eksaferenz, 336-339
ekstremofiller, 143-144
elektrikli balıklar, 284-285, 287-289, 302, 335
Ayrıca bkz. elektrolokasyon
elektrikli vatoz, 299
elektrikli yılanbalığı, 285
elektromanyetik indüksiyon, 321-322
elektromanyetik spektrum, 94
elektroresepsiyon
anlık duyu olarak memelilerde, 302-303
araştırılması, 293
avantajları, 293-294
çok yönlü duyu olarak, 289
dokunma duyusu olarak, 291
elektriğin sudaki iletkenliği, 287, 288
elektrolokasyon, 287-288, 290, 291, 303-304
güvenilirlik, 292
iletişimde, 294-297
koroller deşarjlar, 338-339
ornitorenkte, 334-335
pasif, 300-301
ve avlanma, 292
ve mesafe, 290, 295
ve suyun tuzluluk oranı, 289
Ayrıca bkz. elektrikli balıklar
elektroreseptörler
balıklarda, 288, 291-292, 297
bombus arısı, 305-306
filbalığının knollenorganı, 295, 338
köpekbalıklarının Lorenzini ampulleri, 299, 300, 301
memelilerde, 302-304
ve evrim, 303-304
Elwood, Robert, 130-131, 135
Emlen, Steve, 314
eşekarısı
dokunma duyusu, 171-172
gözler, 56
tat duyusu, 48
evcilleştirme ve köpek yüzleri, 16
evrim
acı/ağrı, 132
balinalar, 240
bıyık oynatma, 174
böcekler, 172
cinsel seçilim, 296
duyusal istifade, 227
ekolokasyon, 248, 254
elektroreseptörler, 303-304
filbalığı, 295-296
gözler, 58, 59-60
güveler, 267
işitme, 217, 220-221, 222, 248
nesli tükenme, 360
nosiseptör, 122
sivrisinekler, 332-333
tür çeşitliliği, 359-360
uzak mesafeleri görebilme, 6, 13
ve renkli görme, 89-90, 91, 92, 100, 118, 119
ve titreşimlerin kemikle iletimi, 205
yarasalar, 254, 268
yunuslar, 268

fare
dokunma duyusu olarak bıyık oynatma, 2, 161, 173-174
ultrasonik ses çıkarma, 244

Farley, Roger, 202-203
feromonlar
güvelerde, 29
hayvanlarda, 32
karıncalarda, 29-32
tanımı, 29
ve vomeronazal organ, 45
fısıldayan yarasalar, 255
fil şahin güvesi, 85
filbalığı, 286, 293, 295-297, 303-304, 338
filler
infrasonik sesleri, 241-243
koku duyusu, 32-37
ve titreşimler, 206-207, 242-243
ve vomeronazal organ, 45
Fishbein, Adam, 231
foklar
bıyıklar, 178-180
çoklu duyu, 334
görme alanı, 73
Forel, Auguste, 32
Fortune, Eric, 284, 288-289, 290, 292-293, 366
fotoreseptörler
duyarlılığa karşı çözünürlük, 65-66
gececil hayvanlarda, 79
işlevi, 6
kelebeklerde, 105-106
koniler ve çubuklar, 84-85, 88, 89
konumu, 58-59
mantis karidesinde, 109
opsinler ve kromoforlar, 57-58
siliyer ve rabdomerik, 66
sineklerlerde, 76
ve görme keskinliği, 63, 72
ve polarize ışık, 115
yanlış alarm vermesi, 79
yılanyıldızında, 69
Francis, Clinton, 359, 360-361, 363
frekans modülasyonlu (FM) yarasalar, 261, 263, 264
Fristrup, Kurt, 355, 356, 363
Fromme, Hans, 313

gagalı balinalar, 273-274, 357
Gagliardo, Anna, 41
Gal, Ram, 171-172
Galambos, Robert, 252
Gall, Megan, 234
Gallio, Marco, 144, 145
gece yanan yapay ışıklar, 351
gececil hayvanlar
görme, 78-81
Geipel, Inga, 259
Gentle, Mike, 127-128
gerçek balinalar ve insan kaynaklı gürültü kirliliği, 358
Godfrey-Smith, Peter, 343
Gol'din, Pavel, 273
Goldscheider, Alfred, 141
Gonzalez-Bellido, Paloma, 75, 77, 366
Gordon, Tim, 361-362, 364
Goris, Richard, 155
göç
balinalarda, 315-316
deniz kaplumbağasında, 316-318
güvelerde, 311
kelebeklerde, 311
kuşlarda, 313, 314, 316, 319
somon balığında, 36-37, 358-359
ve New York Anma Işıkları, 350
görme alanı
insanda, 72
kuşlarda, 70-71, 73
primatlarda, 71
foklarda, 73
ve hayvan habitatları, 73
yeşilbaş ördekte, 71
görme duyusu. *Bkz.* renkli görme; insan: görme; görme
görme keskinliği
ahtapotta, 64

avcı sineklerde, 65
birden fazla keskin görme bölgesi olan hayvanlar, 73
insanda, 63-64, 72
kelebeklerde, 64, 65
kuşlarda, 63-64, 72-73
memelilerde, 63-64
temizlikçi karideste, 64
görme
az ışıklı ya da ışıksız bölgelerde, 79
beynin görüntüleri işleme hızı, 76-77
dağıtılmış, 68-70
denizkestanesinde, 69
deniztarağında, 67-68
derinlik algısı, 71
dinozorlarda, 100
gececil hayvanlarda, 78-81
hareketin renkten önemli olması, 113-114
hayvanların CFF'si, 76-77
hızı, 77
ışık dalgalarının özelliklerini ölçebilme, 26
ışık saptamadan görmeye geçiş evresi, 59
karideste, 114, 115-118
katil sinekte, 75-77
kızıl akbabada, 70-71
kör noktalar, 70-71
monokromatlar, 89-90
sıçrayan örümceklerde, 53
ve avlanma, 219
ve hayvanların çeşitlenmesi, 59-60
ve mesafe, 159
ve opsinler, 52
ve titreşimler, 115
ve zekâ, 53
yılanyıldızında, 69-70
Ayrıca bkz. renkli görme; insan: görme
gözler
akbabada, 71
balinalarda, 73, 89
denizanasında, 60
deniztarağında, 66-68, 77
denizyıldızında, 60-62
dev kalamarda, 56, 83-84
evrimi, 58, 59-60
hayvanlarda, 54-57
insanda, 218
kalamarda, 56, 74, 83-84
karideste, 107-109, 112-113
kılıçbalığında, 83
kriptokromlar, 323-324, 325
kuşlarda, 72-73, 255, 323
mantis karidesinde, 108-111, 112-113, 114, 115, 118
örümceklerde, 190
peri sineklerinde, 56
primatlarda, 62
tapetum, 81
ve hareket saptama, 114
ve polarize ışık, 115
yılanlarda, 155-157
G-proteinine kenetli reseptörler (GPKR'ler), 52
Gracheva, Elena
hayvanların konfor ısısı, 140-141, 143
ördekte dokunma duyusu, 170
yarasaların ısıyı saptaması, 151-152
yılanların ısı sensörleri, 154, 155
Granger, Jesse, 315-316
Grant, Robyn, 173, 174
Grasso, Frank, 340, 341
gri balina, 316
Griffin, Donald
araştırma araçları, 366
"beceriksiz yarasalar", 260
biyologların "basitlik filtreleri", 10
ekolokasyon terimini üretme, 287
manyetik algılama, 314
yarasalarda ekolokasyon, 251-253, 267

Grüsser, Otto-Joachim, 338
Gutnick, Tamar, 342
Guyana yunusu, 302, 303
güneş fırtınaları, 316
gürültü kirliliği, 355-358, 360-361, 363
güveler
  çiftleşme, 248
  çoklu duyu, 334
  evrim, 267
  feromonlar, 29, 35
  göç, 311
  insan kaynaklı ışık kirliliği, 352
  işitme, 247-248, 265-266
  koku duyusu, 28

habitat ve Umwelt, 7
Hagedorn, Mary, 295
Hallem, Elissa, 150
hamamböceği, 171-172
Hartridge, Hamilton, 252
Hasler, Arthur, 37
hayvanlar
  bilinç, 9, 125, 129-130, 132, 133, 136, 253-254
  çoklu duyu, 330, 331-335
  depremi hissedebilme, 203
  duyu organları sayısı, 8
  duyu sistemlerinin yakınsaması, 335
  insan tarafından tam olarak bilinememesi, 9, 254, 260, 328, 335-345
  nesli tükenme ve boyutu, 208
  otomat olarak, 125-126
  Umwelt, 1-5
  Ayrıca bkz. belli hayvanlar
Heffner, Henry, 245-246
Heffner, Rickye, 245-246
Heiligenberg, Walter, 295
Heliconius erato kelebeği, 101-103
Heliconius melpomene kelebeği, 101-102
Helmholtz, Hermann von, 338
Hendricks, Michael, 339
hidra
  fotoreseptörler, 58
hidrodinamik duyu, 163, 177, 178-180, 184-185
Hildebrand, John, 357, 358
Hill, Peggy, 197, 206-207
hindi akbabası, 37-38
hissetme yeteneği, 339
Hofer, Bruno, 181
Hopkins, Carl, 289
Hore, Peter, 325
Horowitz, Alexandra
  "bilgiye dayalı hayalî sıçrama", 11
  insanların kokuyu kullanması, 20, 21
  köpeklerin koku duyusunun incelenmesi, 18, 19
  köpeklerin sürekli koklaması, 15-16
Horwitz, Joshua, 357
How, Martin, 112-113, 114
Hoy, Ron, 223
Hughes, Howard, 294

ıstakoz, 318-319
ışık
  çeşitliliği, 359-360
  dalgaboyu aralıkları, 88, 89-90, 94
  dalgaboyu etkisi, 348, 352-353
  ışığın az olduğu ya da ışıksız bölgelerde görme, 79
  ışık saptamadan görmeye geçiş evresi, 59
  insan kaynaklı kirlilik, 82, 347-353, 362-363
  kızılötesi, 147-148
  okyanusta, 81-82
  özellikleri, 58
  polarize, 115
  radikal çiftleri ve manyetik algılama, 322-325
  ultraviyole, 94-97, 109
  ve fotoreseptörler, 85

ve görme hızı, 77
Ayrıca bkz. fotoreseptörler

infrasonik frekanlar, 244-248, 253
Ayrıca bkz. ekolokasyon
insan: görme
bıyık oynatmayla karşılaştırma, 173-174
dalgaboyu aralığı, 94
ekolokasyon, görme biçimi olarak, 278-281
görme alanı, 71
gözler, 56
keskinliği, 63-64, 72
önceliği, 9, 70
renk, 88, 90-91, 99, 103-104, 105
UV ışığı, 95
insanbiçimcilik, 10
insan
acı/ağrı, 124, 134
Antroposen'in getirdiği değişim, 347-361
beyin, 281-282, 296, 342
çoklu duyu, 334
dokunma duyusu, 162, 164-165, 342
duyu organlarının sayısı, 8-9
duyu sistemlerinin yakınsaması, 335
ekolokasyon, 275-276, 277-282
elektriği hissetme, 300-301
feromonlar, 29
gökbilimcilerin Umwelt'i, 365-366
gözler, 56, 218
gürültü kirliliği, 82, 355-358, 363
hayvanları gerçek anlamda bilememe, 9, 254, 260, 328, 334-345
hayvanların duyu sistemlerini anlamada yanlılık, 328
ışık kirliliği, 82, 347-353, 362-363
insan ve hayvan Umwelt'lerini karşılaştırma, 1-5
işitme, 218, 229, 237, 261-264
koku duyusu, 17, 20, 21, 28
koku duyusunun köpeklerle karşılaştırılması, 16-17, 21, 23, 25
köpeklerin koklamasına verdiği tepki, 19-20, 21
kulaklar, 216-217
manyetik algılama yetisi, 327
merkezî sinir sistemi, 341
TRP kanalları, 142
ve titreşimler, 208-209, 216, 219
vücudun dokunmaya duyarlı bölgeleri, 161
iplik kurdu, 149-150
iribaş, 193-195
ispermeçet balinası
biyolüminesansın tetiklenmesi, 83-84
ses çıkarma, 271-272
işitme duyusu
asalaklar ve asalaklık, 150-151
balıklarda, 273, 361-362
balinalarda, 237-240, 243-244
baykuşta, 215-216, 217-218
böceklerde, 192
frekansı, 229, 237, 245-246
insanda, 218, 237
karanlık basarken, 243
kelebeklerde, 247
kene sensörleri, 152-153
kızılötesi ışıktan yayılan, 147-148
kurbağalarda, 247
kuşlarda, 229-232, 233-237
memelilerde işitme aralığı, 245-247
ses dalgalarının özelliklerini ölçme yetisi, 26
ses yüksekliği ve frekans aralığı, 237
seslerin zamansal doğası, 230-232
sinekkuşunda, 146, 247
ve avlanma, 219, 222, 223
ve çiftleşme, 219, 222, 223
ve evrim, 217, 220-221, 222, 248
ve iletişim, 222

ve mesafe, 159, 219, 245-246
yarasa sensörleri, 151
yarasalarda, 228, 255
yılan sensörleri, 154-156
Ayrıca bkz kulak; ekolokasyon; titreşimler

Jacobs, Gerald, 92-93, 95
Jacobson organı, 8, 42, 45
Jahai, 24
Jakob, Elizabeth
araştırma araçları, 366
sıçrayan örümcekler, 53-55
Japon balığı, 99, 128
jartiyer yılanı, 43, 45
Jeffery, Glen, 95
jeomanyetik alanlar. *Bkz.* manyetik alanlar
Johnsen, Sonke
bilimsel bilgi, 8
deniztarağı, 67
dev kalamar, 84
geçmişi, 11
insan yapımı ışığın etkileri, 82, 349
kendi Umwelt'inin ötesine geçme, 11
manyetik reseptörler, 320, 329
Medusa'nın kullanımı, 82
Jordan, Gabriele, 103, 104
Jung, Julie, 195
Junkins, Maddy, 139, 140

Kaas, Jon, 167
kabuklular ve polarize ışık. 115
kafadanbacaklılar
acı/ağrı, 133-134, 136-138
fotoreseptörler, 58-59, 89
polarize ışık, 115
Ayrıca bkz. ahtapot
Kajiura, Stephen, 300-301
kalamar
acı/ağrı, 133-134
gözler, 56, 74, 83-84
insanlar tarafından görülen ilk dev kalamar, 84
nosisepsiyon, 134
Kalmijn, Adrianus, 299-300
Kambriyen patlaması, 60
kambur balina
insan kaynaklı gürültü kirliliği, 358, 363
ses çıkarma, 237
kan
besin olarak, 151
Kane, Suzanne Amador, 11, 186
kanguru sıçanı, 220
Kant, 24
kaplan gezgin örümceği, 188-189
kaplan güvesi, 266
kaplumbağa
CFF, 77
doğduğu yerin manyetik imzası, 319
insan kaynaklı, 351-352
ve manyetik alanlar, 317-318
Kapoor, Maya, 360
kapsaisin ve çıplak kör fare, 121, 122
kara hayalet bıçakbalığı, 286-287, 288, 289, 290, 294
Blix, Magnus, 141
kara kurbağası
CFF, 77
karalama böceği, 204
karbondioksit ve çıplak kör fare, 121
karıncalar
çoklu duyu organları, 335
çoklu duyu, 334
görme, 94, 95
koku duyusu, 29-32
karides
görme keskinliği, 64
görme, 114, 115-118
gözler, 107-109, 112-113
renkli görme, 108-112
karşıt süreç, 88, 90

katil balina (orka), 358
katil sinekler, 75-77
Keays, David, 321, 322, 325, 327, 330
kedi
  CFF, 77
Kelber, Almut, 72, 85, 97, 366
kelebekler
  av olarak, 101-102
  fotoreseptörler, 59, 105-106
  göç, 311
  görme keskinliği, 64, 65
  işitme, 247
  renkli görme, 102-103
kemancı yengeç, 196
kemirgenler
  ultrasonik ses çıkarma, 339-340
kene yoncası ağaçpiresi, 198-200
kene, 7, 152-153
keşiş yengeci, 130
Ketten, Darlene, 244
kılıçbalığı
  CFF, 77
  gözler, 83
  kuyruğundaki UV işaretler, 96-97
kınkanatlılar, 356
kırmızı postacı kelebeği, 92
kış uykusu, 139-140
kıyı kuşları, 170-171
kızıl akbaba
  görme, 70-71
kızılötesi ışık, 147-148
kimyasal duyular, 8, 25-26
  Ayrıca bkz. koku duyusu; tat duyusu
kirlilik
  COVID-19 dönemi, 362-363
  duyusal kirliliği hedef alma, 362
  farklı insan tipleri, 358-359
  gürültü kirliliği, 355-358, 360-361, 363
  ışık kirliliği, 82, 347-353, 362-363
Kirschvink, Joseph, 327
Kish, Daniel, 275-276, 277-278, 279-282, 334
klonal akıncı karıncalar, 28-29, 31-32
knollenorgan, 295, 296, 338
Knop, Eva, 352
Knudsen, Eric, 217-218
koku duyusu
  Afrika filinde, 32-34, 35-36
  Batılı bakış açısı, 24
  betimleyici kelimeler, 24
  deniztarağında, 67, 68
  dinozorlarda, 38
  farklı hayvanları karşılaştırma, 28
  feromonlar, 29-32, 45, 47
  fillerde, 32-37
  güvelerde, 28
  hayvanların yön bulması, 36-37
  insan ile köpeğin karşılaştırılması, 16-17, 21, 23, 25
  insanda, 17, 21, 28
  karıncalarda, 28-29
  köpek ile Afrika filinin karşılaştırılması, 33
  köpeklerde, 15-23, 25
  kuşlarda, 37-40
  mükemmel koku alan hayvanlar, 23
  stereo koku alma, 41, 43
  tat duyusuyla karşılaştırılması, 46-47, 52
  uyaranı fark etmeden algılama ve tepki verme, 126
  ve avcı-toplayıcılar, 24
  ve avlanma, 219
  ve deneyimler, 47
  ve mesafe, 159
  ve titreşimler, 28
  yılanlarda, 41-46, 48
  yön bulma aracı olarak, 36-37
koku molekülleri (odorant)
  çeşitliliği, 26
  difüzyon, 18

hayvanlar, 19
insan ve köpek duyarlılığının karşılaştırılması, 17, 23
kokularla karşılaştırma, 15
reseptörler, 26-28, 31, 52
ve anılar, 36-37, 358-359
koku soğancığı
dinozorlarda, 38
insanda, 23, 339
köpeklerde, 16
kuşlarda, 38, 39
kokular, 15
Konishi, Masakazu, 217-218, 229
koroller deşarjlar, 338-339
Kotler, Burt, 157
köpekbalığı
avlanma, 300-301
çoklu duyu, 334
elektromanyetik indüksiyon, 321-322
görme, 89
köpek
çoklu duyu, 334
evcilleştirme ve yüz, 16
kızılötesi sensör olarak burun, 158-159
koku duyusu, 15-23, 25
koku duyusunun Afrika filleriyle karşılaştırılması, 33
koku duyusunun insanlarla karşılaştırılması, 16-17, 21, 23, 25
renkli görme, 86-88, 90
Krahling, Abby, 346, 347
kral kelebeği, 311
kritik titreşim kaynaşma frekansı (CFF), 76-77
kromoforlar, 58
Kronauer, Daniel, 29, 31-32
Kröger, Ronald, 158-159
kulak
böceklerde, 221, 222, 223-224
evrimi, 221
insanda, 216-217
kurbağada, 226-227
kuşlarda, 218, 322
memelilerdeki benzerlikler, 220
kum akrebi, 202-203
kurbağalar
av olarak, 119
çiftleşme, 225-228
embriyo, 193-195
kulaklar, 226-227, 247
ve titreşimler, 194-195
kurtlar, 204-205
kuşlar
beyin, 72-73, 324
CFF, 77
çoklu duyu, 334
dokunma duyusu, 161, 169-171, 172, 186-187
elektromanyetik indüksiyon, 322, 323-324
göç, 313, 314, 316, 319
görüş alanı, 71, 73
gözler, 323
insan kaynaklı gürültü kirliliği, 355, 356, 360-361
insan kaynaklı ışık kirliliği, 350, 351
işitme, 229-232, 233-237
kırmızı ışığın etkisi, 352
koku duyusu, 37-41
kulaklar, 218, 322
manyetik algılama, 319
renkli görme, 98-101
tatlılığı saptayabilme, 51-52
UV işaretler, 96
Ayrıca bkz. yırtıcı kuşlar; ötücü kuşlar
küçük kahverengi yarasa, 346, 348
küre ağ ören örümcekler. *Bkz.* örümcekler

Laming, Peter, 128
Land, Mike
deniztarağının gözleri, 68

sıçrayan örümceklerde görme, 54
ve Marshall, 108
Lawson, Shelby, 231
Leitch, Duncan, 185
Libersat, Frederic, 171-172
liman foku, 178-181
Linsley, Earle Gorton, 146
Lissman, Hans, 287, 299
Listening in the Dark (Griffin), 252, 260
Liu, Molly, 332
Lohmann, Catherine, 317, 318
Lohmann, Ken, 317, 318-320, 329
Longcore, Travis, 350-351, 353
Lorenzini, Stefano, 299
Lubbock, John, 94-95
Lucas, Jeffrey, 232-233, 234

Maan, Martine, 119
Machin, Ken, 287
MacIver, Malcolm
elektrolokasyon, 286-287, 289-292
uzun mesafeleri görebilmenin önemi, 6, 13
Macpherson, Fiona, 8
Majid, Asifa, 24
Malebranche, Nicolas, 125-126
Maler, Leonard, 289
manati, 174-177
mantis karidesi, 107-113, 114, 115-118
manyetik alanlar
araştırmalar, 328
böceklerin tepkileri, 314
değişimleri ve manyetik imzalar, 319
Dünya'nın manyetik alanlarının ters dönmesi, 317-318
dünyanın manyetik alan tanımı, 311
güneş fırtınalarının etkisi, 315-316
kuş göçü, 313, 314, 316, 319
manyetik algılama ve Dünya'nın zayıf manyetik alanı, 314-315, 329
ötücü kuşlar tarafından görülebilmesi, 324-325
özellikleri, 317
ve mesafe, 318
manyetik algılama duyusu
araştırmalar, 312-313, 314, 327, 328-330
balıklarda, 315
çıplak kör farelerde, 315
diğer duyularla kullanımı, 330
Dünya'nın zayıf manyetik alanları, 314-315, 329
ıstakozlarda, 318-319
insanlarda, 327
kaplumbağalarda, 317-318
kuşlarda, 319
mekanizması, 320-327, 328-329
ve mesafe, 318
yarasalarda, 315
Ayrıca bkz. göç
manyetit, 321
Marshall, Justin, 107-108, 111, 114
Martin, Graham, 70-71
Matos-Cruz, Vanessa, 140-141, 142
mavi balina
ses çıkarma, 238, 239
yiyecek arama, 240-241
Maxim, Hiram, 252
Maximov, Vadim, 89
mayıssineği, 74, 352
McBride, Arthur, 268
McClure, Christopher, 356
McGann, John, 23
Medusa (gizli kamera), 82-83, 84
Meissner cisimcikleri, 164
mekanik duyular, 8-9
Ayrıca bkz. işitme duyusu; dokunma duyusu; titreşimler
mekanoreseptörler, 6
yarasalarda, 187-188
kuşlarda, 169-171, 172, 187
balıklarda, 172
böceklerde, 171-172, 189, 190-192

memelilerde, 173
işleyişi, 164, 219
türleri, 163-164
Meksika serbest kuyruklu yarasası, 259
Melchers, Mechthild, 188
Melin, Amanda, 62-63, 92, 93, 105
memeli kılları, 173
memeliler
ağrının belli bir yerde hissedilmesi, 134
ekolokasyon, 275-276
elektroreseptörler, 302-304
görme keskinliği, 63-64
işitme aralığı, 245-247
kıllar, 173
kulak benzerlikleri, 220
mekanoreseptörler, 173
UV ışığını görebilme, 95
Ayrıca bkz. insan; insan: görme
Menzel, Randolf, 119
Merkel sinir uçları, 163-164
Merkel, Friedrich, 313, 314
merkezî sinir sistemi, 129-130, 339, 341-342
Ayrıca bkz. beyin
meyve sineği, 130, 144-145
Mhatre, Natasha, 213
Middendorff, Alexander von, 313
Miller, Ashadee Kay, 19
Millsopp, Sarah, 128
Monet, Claude, 95
monokromasi, 89-90, 92
Morehouse, Nate, 57
Morley, Erica, 307
mormirin, 295-297
Mortimer, Beth, 209-210, 212
Moss, Cindy, 253-254, 256, 258
Moss, Cynthia, 34, 242
Mouritsen, Henrik, 324, 325, 327, 328, 329
Murray, R.W., 299
mücevher eşekarısı, 171-172
mürekkepbalığı ve insan kaynaklı gürültü kirliliği, 358

Nachtigall, Paul, 269, 270
Nagel, Thomas, 9, 253-254, 260, 345
Narins, Peter, 206
Nature, 244
Neeley, Liz, 153
Neitz, Jay, 86-88, 92-94, 95
Neitz, Maureen, 86, 93-94
Nephila örümcekleri, 209-212
Nevitt, Gabrielle, 39-40, 41
Nicolson, Adam, 41
Nilsson, Dan-Eric, 58-59, 60
Norris, Ken, 268, 272
nosiseptör/nosisepsiyon
kalamar, 134
meyve sinekleri, 130
temel gerçekler, 121-122
ve acı/ağrı, 121-125, 127
ve evrim, 122, 132
nöromast, 181-183

O'Connell, Caitlin, 207-208, 242-243
Olivos Cisneros, Leonora, 28-29, 32
oluklu balina (Fin balinası)
ses çıkarma, 237, 238, 239
olumlu yargı yanlılığı, 20
opsinler
görmenin temeli olarak, 52
ve kromoforlar, 57-58
ve renkli görme, 88, 91, 92
ornitorenk
dokunmaya en duyarlı bölgeleri, 161
elektrolokasyon, 303
elektroresepsiyon, 334-335
Ortega, Catherine, 360-361
Ossiannilsson, Frej, 201, 210

ördek
mekanoreseptörler, 169-170

örümcekler
aktivite seviyesi, 53
avlanma taktikleri, 53-54
bilişin uzantısı olarak ağ, 213
çoklu duyu, 334
dokunma duyusu, 190-192
elektroresepsiyon, 307-309
gözler, 54-55, 56, 190
ipek ağın özellikleri, 210, 212, 307
mekanoreseptörlerle dokunma duyusu, 188-189
UV görüş, 96
ve titreşimler, 210-212
zekâ, 53-54
ötücü kuşlar
çoklu duyu, 334
Dünya'nın manyetik alanını görebilme, 324-325
elektromanyetik indüksiyon ve gözdeki kriptokromlar, 323-324
göç, 319
tatlılığı saptama, 51
öznellik ve duyular, 9

Pacini cisimcikleri, 164
Pacini, Aude, 273
Page, Rachel, 228
Park, Thomas, 121, 122
pasif elektroresepsiyon, 300-301
Paul, Sarah Catherine, 90
Payne, Katy, 237, 238, 241-242, 243
Payne, Roger, 215-216, 237, 238, 241
Peet, Margriet, 355
Peichl, Leo, 89
Pelger, Susanne, 60
peri sineği
gözler, 56
Pierce, Naomi, 146
Piersma, Theunis, 170, 171
Platon, 24
polarize ışık, 115
Poole, Joyce, 242
Porter, Jess, 24-25
Porter, Megan, 58
Prior, Nora, 232
propriyosepsiyon, 8, 336
Proust, Marcel, 14
Pye, David, 221

radikal çiftleri ve manyetik algılama, 322-325, 329
rakun
görme, 89
Ramsier, Marissa, 219
Rasmussen, Bets, 34-35, 36
Ratcliffe, John, 255-256
reaferenz, 336-339
Redetzke, Nate, 153-154
Reep, Roger, 176
Reichmuth, Colleen, 13, 177-178, 179
Remple, Fiona, 168
"renk körü" insanlar, 90-91
"Renk Körü Ressam Vakası" (Sacks ve Wasserman), 88
renkli görme
arılarda, 97
dikromasi, 90-91
insanda, 88, 90-91, 99, 105
karşıt süreç, 88
köpek testi, 86-88
köpekte, 86-88, 90
kuşlarda, 98-101
mantis karidesinde, 108-112
opsinler, 88, 91, 92
öznellik, 98
spektral olmayan renkler, 99, 100-101
UV, 94-97, 109
ve av-avcı ilişkisi, 119
ve beyin, 88, 119
ve evrim, 89-90, 91, 92, 100, 118, 119
yılanda, 155-156
zebra balığında, 105

reseptörler
G-proteinine kenetli, 52
koku molekülü, 26-28, 31, 52
tat duyusu, 48
ve uyaranları saptama, 5-6
Ayrıca bkz. manyetik algılama duyusu; fotoreseptörler
Ritz, Thorsten, 323
Robert, Daniel, 223, 305-306, 307, 309
Roberts, Nicholas, 112-113
Robinson, Nathan, 82
Rochon-Duvigneaud, André, 187
Roeder, Kenneth, 266
Ros, Margaret, 154
Rose, J.D., 129
Rosenthal, Gil, 96-97
Rubin, Juliette, 250-251, 265, 266-267
Ruffini sinir uçları, 164
Rutland, Mark, 165
Ryan, Mike, 11-12, 198, 225-228
Ryerson, Bill, 44

sabit frekanslı (SF) yarasalar, 261, 263-265
Sacks, Oliver, 88
Salgado, Vincent, 152
sansargiller, 162
Santana, Carlos David de, 285
saplı hav, 187
Sawtell, Nate, 296, 297
Schmitz, Helmut, 147-148, 149
Schnitzler, Hans-Ulrich, 263-264
Schraft, Hannes, 157
Schulten, Klaus, 323
Schwenk, Kurt, 42, 43, 44, 48, 366
Science, 327
Scientific American, 202
Seehausen, Ole, 359-360
semenderler, 352
Seneviratne, Sampath, 172
Sensory Exotica (Hughes), 294
ses dalgaları
ve yoğunluk, 273
ve mesafe, 356, 44
Sherrington, Charles Scott, 123
sıcakkanlı hayvanlar
TRP kanalları, 142
ve asalaklar, 150-151
Ayrıca bkz. memeliler; belli türler
sıcaklık
hayvanlarda konfor sıcaklıkları, 140-141, 142, 143
sensör olarak TRP kanalları, 141-143
sinek sensörleri, 144-145
Ayrıca bkz. ısı
sıçan
ultrasonik ses çıkarma, 245
sıçrayan örümcekler
avlanma taktikleri, 54
çoklu duyu, 334
görme ve yaş alma, 57
gözler, 54-55, 56
zekâ, 53-54
sırtlan
görme keskinliği, 63
Sidebotham, Joseph, 244
Siebeck, Ulrike, 97
Silent Thunder (Katy Payne), 241
Simmons, James, 254, 256
sincap maymunu, 92-93
sincap
kış uykusu, 139, 140
konfor ısısı, 140-141, 143
TRP kanalları, 142
ultrasonik ses çıkarma, 245
ve çıngıraklıyılanlar, 156
sinekkuşu
CFF, 77
fotoreseptörler, 76
görme alanı, 74
görme keskinliği, 65
ısı sensörleri, 144-145

insan kaynaklı gürültü kirliliği, 356
işitme frekansı aralığı, 247
kulak, 223, 224
nosiseptör, 130
renkli görme, 98, 99
ses çıkarma, 247
sinekler
tatlılığı saptayabilme, 51-52
sinestezi, 334-335
sinir sistemi ve bilinç, 129-130, 339
sismik duyu. *Ayrıca bkz.* titreşimler
sivrisinekler
avlanma, 331-332, 333
çoklu duyu nöronları, 335
evrim, 332-333
tat reseptörleri, 48
titreşimleri saptama, 2-3
Slabbekoorn, Hans, 355
Smith, Chuck, 44
Sneddon, Lynne, 127-128
Soares, Daphne, 183, 184
Sobel, Noam, 26
soğukkanlı hayvanlar
TRP kanalları, 142
solucanlar, 204-205
somon göçü, 36-37, 358-359
son vızıltı, 256
sonar, 5, 357
Ayrıca bkz. ekolokasyon
Spallanzani, Lazzaro, 251
Speiser, Daniel, 66, 67-68
spektral olmayan renkler, 99
Spoelstra, Kamiel, 348
Stager, Kenneth, 38
Standing Bear, Luther, 209
Stebbins, William, 219
Stein, Rick, 130
Steinbuch, Johann Georg, 338
Sterbing, Susanne, 188
Stevens, Martin, 90
Stoddard, Mary Caswell "Cassie", 98, 99, 100
Streets, Amy, 106, 107, 112
Strobel, Sarah, 160-161, 162
su piresi
renkli görme, 88
Sumner-Rooney, Lauren, 69-70
Supa, Michael, 279
Suraci, Justin, 357
Surlykke, Annemarie, 255
süngerler, 318-319

şahin güvesi, 266
şeritli çıngıraklıyılan, 43-44
şişen engerek, 19
şizofreni, 339

Tang, Yezhong, 157
tapetum, 81
tarsiyer, 247
tat duyusu
ahtapotta, 341
böcek reseptörleri, 48-49
en kaba duyu olarak, 47
koku duyusuyla karşılaştırılması, 46-47, 52
refleksif doğası, 46-47
tümyönlü olması, 49
uyaranı fark etmeden algılama ve tepki verme, 126-127
yayınbalığında, 49
tatlılık
saptanabilirliği, 48, 49, 51
Tautz, Jürgen, 192
tavuk
mekanoreseptörler, 169
tavus kuşu mantis karidesi, 107-113, 114, 115-118
tavus kuşu, 186-187
tembelhayvan
görme, 89
temizlikçi karides

görme keskinliği, 64
Temple, Shelby, 115
ter arısı
görme, 78-81
termotaksi, 145
testerebalığı, 301-302
tetrakromasi, 98-101, 103-104
tevazu ihtiyacı, 10-11
Thaler, Lore, 281, 282
The Elephant's Secret Sense (O'Connell), 207
The Optics of Life (Johnsen), 57
The Seabird's Cry (Nicolson), 41
The Senses (Macpherson), 8
Thoen, Hanne, 109
titreşimler
ağaçpirelerinde iletişim, 12
araştırmalar ve yüzey dalgaları, 197
betimleyici kelimeler, 196
kemik iletimi, 205-206
titreşim şarkıları, 198-199, 201
ve alligatorlar, 184-185
ve avlanma, 204-205, 206
ve balıklar, 182
ve baykuşlar, 217
ve böcekler, 2-3, 196, 198-204
ve çiftleşme, 195-196, 200, 208
ve dokunma duyusu, 164, 165, 166
ve filler, 206-207, 242-243
ve görme, 115
ve insanlar, 208-209, 216, 217
ve kokular, 28
ve kurbağalar, 194-195
ve örümcekler, 210-212
ve solucanlar, 204-205
ve yengeçler, 196
Ayrıca bkz. bıyık ve bıyık oynatma
toprak solucanı, 336-337
trikromasi, 90, 92, 93, 102-104, 118
TRP kanalları, 141-143, 151-152, 155
túngara kurbağası, 225-228
tüp burunlular, 38, 39-40, 41
Türlerin Kökeni (Darwin), 60, 286

Ubangi filbalığı (Peter'ın fil burunlu balığı), 296, 332, 334
Uexküll, Jakob von
duyu pencereleri olan ev benzetmesi, 4, 333
gökbilimcinin Umwelt'i, 365
hissedebilen varlıklar olarak hayvanlar, 4
Umwelt terimini üretme, 3
Umwelt'ler arası geçiş, 13
ve kene, 7, 152
uğurböcekleri, 356
ultraviyole (UV) ışık ve görme, 94-97, 109
umami
saptanması, 49, 51, 52
Umwelt
genişlemesi, 13
gökbilimci, 365-366
insan-hayvan karşılaştırması, 1-5, 10
kendi Umwelt'inin ötesine geçme, 11
terimin üretilmesi, 3
ve insanbiçimcilik, 10
uyaranlar
duyu sistemlerince süzülmesi, 7
enformasyon olarak, 6
saptanması, 5-6
"uzaktan dokunma", 171
uzun yüzgeçli kalamar, 133-134

vampir yarasa, 151-152
Van Beveren, Daniel, 186
Van Doren, Benjamin, 350
vatoz
avlanma, 300, 301-302
elektromanyetik indüksiyon, 321-322
Venkataraman, Krithika, 331, 333
Vernaleo, Beth, 231

vibrissa. *Bkz.* bıyık ve bıyık oynatma
Victoria Gölü (Doğu Afrika), 359-360
Viguier, Camille, 322
vomeronazal organ, 8, 42, 45
Vosshall, Leslie, 46, 48, 331, 332, 335

Walkowicz, Lucianne, 316
War of the Whales (Horwitz), 357
Ware, Heidi, 356
Warkentin, Karen, 193-195
Warrant, Eric
  fil şahin güvesi deneyi, 85
  gececil hayvanlarda görme, 78-81
  güveler, 310, 311
  hayvanların doğasında çoklu duyu, 330
  manyetik algılama araştırmaları, 312, 329
  manyetik reseptörler, 320, 325
Wasserman, Robert, 88
Watanabe, Takeshi, 212-213
Waterman, Ian, 336
Webb, Barbara, 224
Webb, Douglas, 238
Wehner, Rüdiger, 7
Weimerskirch, Henri, 40
Weiss, Tali, 23
Wells, Martin, 342, 343
Wenzel, Bernice, 38-39
Wheeler, William Morton, 335
Widder, Edith, 82-83, 84
Williams, Brandy, 201
Williams, Catherine, 138
Wilson, E.O., 30, 32
Wiltschko, Roswitha, 315, 324, 327
Wiltschko, Wolfgang, 313, 314, 315, 324, 327
Wittemyer, George, 36
Woodhouse çalı kargası, 360-361
Wu, Le-Qing, 322
Wueringer, Barbara, 302

X kromozomu ve trikromasi, 93, 102-104

yaban doğa kavramı, 364-365
Yack, Jayne, 222, 223
yalancı katil balina, 270, 273
yanal çizgi, 181-183, 291-292, 301, 337
yangın böceği, 146-149
Yaqui yayınbalığı, 360
"Yarasa Olmak Neye Benzer" (Nagel), 9
yarasalar
  avlanma, 228, 250-251, 258-259, 265-266, 267
  başarısı, 261
  beyaz ışığın etkisi, 348
  beyin, 256
  ekolokasyon, 248, 251-260, 264-265, 267
  evrim, 254, 268
  frekans modülasyonlu (FM), 261, 263, 264
  iletişim, 259
  insan kaynaklı ışık kirliliği, 348
  işitme duyusu, 255
  kırmızı ışığın etkisi, 352
  manyetik algılama, 315
  mekanoreseptörler, 187-188
  sabit frekanslı (SF), 261, 263-265
yayınbalığı
  tat duyusu, 49
yengeç
  insan kaynaklı gürültü kirliliği, 358
  ve acı/ağrı, 130
  ve titreşim, 196
yer sincabı
  çıngıraklıyılan, 156
  kış uykusu, 139-140
  konfor ısısı, 140-141, 143
  TRP kanalları, 142
  ultrasonik ses çıkarma, 245
yılanlar
  avlanma, 156

dokunma duyusu, 185
fotoreseptörler, 58
gözler, 155-157
ısı sensörleri, 154, 156
koku duyusu, 41-46, 48
yeme alışkanlıkları, 47-48
yılanyıldızı, 69-70
yıldız burunlu köstebek, 165-169, 302, 334
yırtıcı kuşlar
görme keskinliği, 63-64, 72-73
görüş alanı, 70-71
gözler, 72-73, 255
kulaklar, 218
yön bulma ve koku duyusu, 36-37, 41
yönelme, 49, 289-290
Ayrıca bkz. göç
Yu, Nanfang, 146
yunuslar
araştırmalar ve yunusların özellikleri, 268-269
avlanma, 274, 275
duyu sistemlerinin yakınsaması, 335
ekolokasyon, 269, 270, 272-273
elektroreseptörler, 302, 303
evrim, 268
ses çıkarma, 271, 272
yusufçuk
avlanma, 76
CFF, 77
insan kaynaklı ışık kirliliği, 352
yuvarlak solucanlar (nematod), 149-150
yüzgeçayaklılar
bıyıklar, 178-180
görme alanı, 73
zebra
şeritleri, 62-63
zebra balığı
renkli görme, 105
zebra ispinozu, 229, 231, 232
zekâ ve görme, 53
Zelenitsky, Darla, 38
zeytin deniz yılanı
fotoreseptörler, 58
Zullo, Letizia, 342-343
zürafa
görme keskinliği, 84
Zylinski, Sarah, 11



2023 ROYAL SOCIETY TRIVEDI BİLİM KİTABI ÖDÜLÜ

2023 ANDREW CARNEGIE MEDAL

Dünya görüntüler ve dokular, sesler ve titreşimler, kokular ve tatlar, elektriksel ve manyetik alanlarla dolu. Ne var ki insan dahil her hayvan, kendi benzersiz duyusal baloncuğunun içinde yaşıyor ve bu uçsuz bucaksız, muazzam dünyanın sadece küçük bir bölümünü algılayabiliyor.

Pulitzer Ödüllü Ed Yong, şimdiden bu yüzyılın en büyük kurgu dışı eserleri arasında gösterilen *Muazzam Dünya*'da, bizi kendi duyularımızın sınırlarının ötesine götürerek, etrafımızı saran koku ağlarını, elektromanyetizma dalgalarını ve sesleri algılamamızı sağlıyor. Ateşe çekilen böcekler, Dünya'nın manyetik alanlarının izini sürebilen kaplumbağalar, nehirleri elektriksel mesajlarla dolduran balıklar, kur yapan böceklerin işitilmez şarkıları karşısında titreşen bitkiler, yarasa misali sonar kullanabilen insanlar ile karşılaşıyor; arıların çiçeklerde ne gördüğünü, ötücü kuşların birbirlerinin melodilerinde ne duyduğunu, köpeklerin sokakta neyi kokladığını öğreniyoruz. Beş duyumuzun kifayetsiz kaldığı bu koca evrendeki keşiflerin hikâyelerini dinliyor, henüz çözülmemiş gizemlere dair tahminler yürütüyoruz.

Eğlenceli, titiz ve keşif arzusuyla dolu *Muazzam Dünya*, Marcel Proust'un "tek hakiki yolculuk... diyarları ziyaret etmek değil, başkalarının gözlerinden bakarak her birinin gördüğü yüzlerce evreni görmektir," diye tanımladığı yolculuğa çıkarıyor bizleri.

"Bilimle yoğrulmuş, büyüleyici bir keşif yolculuğu."
SIDDHARTHA MUKHERJEE

YILIN EN İYİ KİTABI
Wall Street Journal • New York Times • Time • People
Publishers Weekly • New Yorker • Washington Post
Guardian • Economist • Esquire





978-605-198-381-3

domingo
www.domingo.com.tr