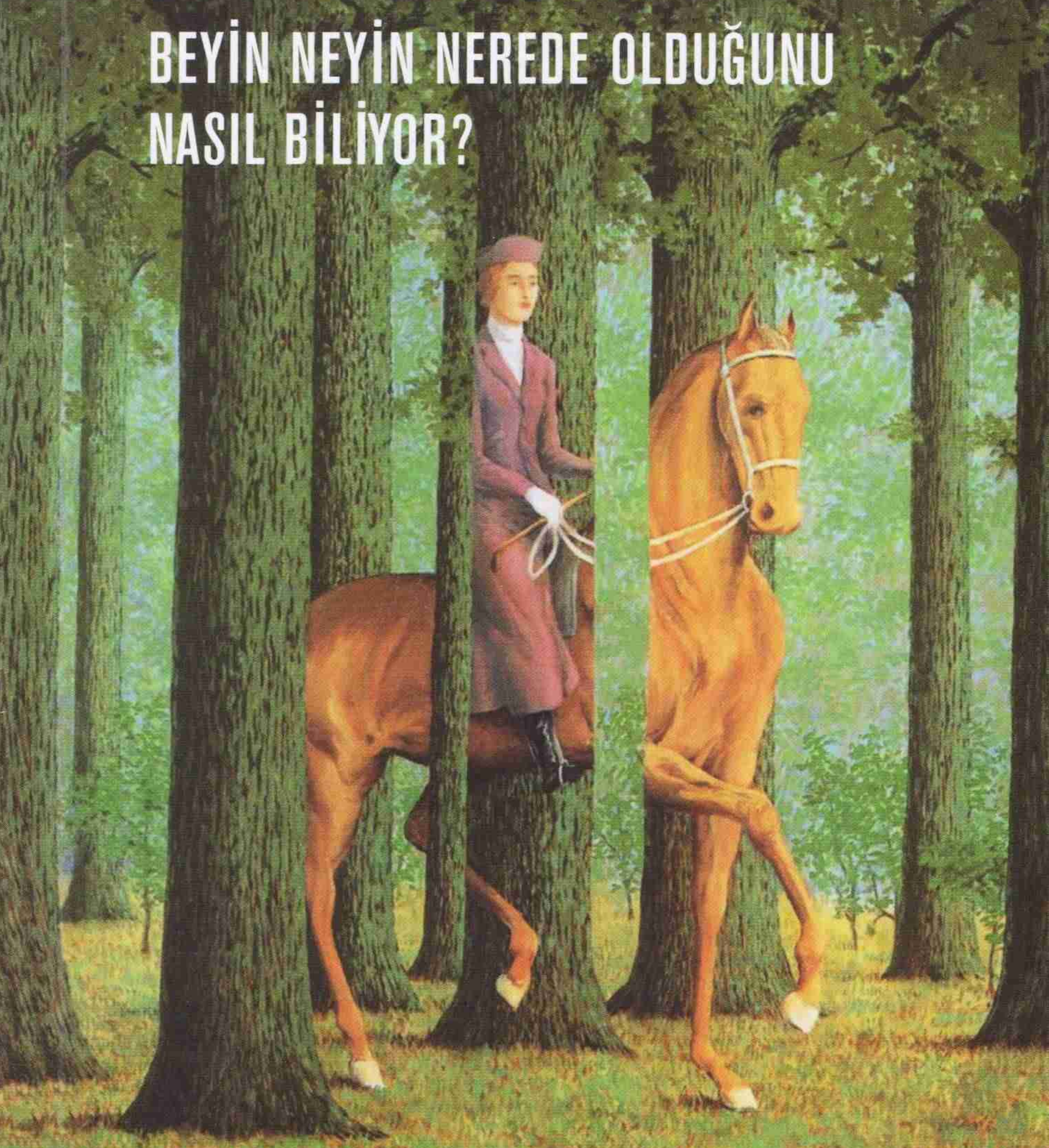
JENNIFER M. GROH

Mekân Yaratmak

BEYİN NEYİN NEREDE OLDUĞUNU NASIL BİLİYOR?



metis bilim | 29

JENNIFER M. GROH

Mekân Yaratmak

BEYİN NEYİN NEREDE OLDUĞUNU NASIL BİLİYOR?

1966'da Hartford, Connecticut'ta doğdu. Princeton Üniversitesi biyoloji bölümünden mezun olduktan sonra, sırasıyla Michigan ve Pennsylvania Üniversitelerinde sinirbilim üzerine master ve doktora yaptı, doktora sonrası çalışmalarını ise Stanford Üniversitesi'nde tamamladı. Araştırmalarında özellikle beynin görme ve işitme duyularını nasıl harmanladığı konusuna yönelerek, beynin her yerinde bu iki duyu arasında sıkı bir etkileşim olduğunu gösterdi. Halen Duke Üniversitesi Bilişsel Sinirbilim Merkezi'nde, Psikoloji ve Sinirbilim bölümünde ve Nörobiyoloji bölümünde profesör olarak ders vermekte olan Groh'un makaleleri *Neuron*, *Current Biology*, *Nature Neuroscience*, *Journal of Neuroscience* ve *Journal of Neuropsychology* gibi birçok saygın bilim dergisinde yayımlanmaktadır.

Metis Yayınları
İpek Sokak 5, 34433 Beyoğlu, Istanbul
e-posta: info@metiskitap.com
www.metiskitap.com
Yayınevi Sertifika No: 10726

Mekân Yaratmak
Beyin Neyin Nerede Olduğunu
Nasıl Biliyor?
Jennifer M. Groh

İngilizce Basımı:
Making Space
How the Brain Knows Where Things Are
Harvard University Press, 2014

© Jennifer M. Groh, 2014

Akçalı Telif Hakları Ajansı aracılığıyla
Harvard University Press ile yapılan sözleşme temelinde
yayınlanmıştır.

© Metis Yayınları, 2015
Çeviri Eser © Gürol Koca, 2016

İlk Basım: Eylül 2016

Yayıma Hazırlayan: Özde Duygu Gürkan

Kapak Resmi: René Magritte,
Le Blanc-Seing (Açık Çek), 1965
Kapak Tasarımı: Emine Bora

Dizgi ve Baskı Öncesi Hazırlık: Metis Yayıncılık Ltd.
Baskı ve Cilt: Yaylacık Matbaacılık Ltd.
Fatih Sanayi Sitesi No. 12/197 Topkapı, İstanbul
Matbaa Sertifika No: 11931

ISBN-13: 978-605-316-050-2

Eserin bütünüyle ya da kısmen fotokopisinin çekilmesi, mekanik ya da elektronik araçlarla çoğaltılması, kopyalanarak internette ya da herhangi bir veri saklama cihazında bulundurulması, 5846 Sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunu'nun hükümlerine aykırıdır ve hak sahiplerinin maddi ve manevi haklarının çiğnenmesi anlamına geldiği için suç oluşturmaktadır.

JENNIFER M. GROH

Mekân Yaratmak

BEYİN NEYİN NEREDE OLDUĞUNU NASIL BİLİYOR?

Çeviren: Gürol Koca

metis

Benden desteğini esirgemeyen aileme

İçindekiler

Teşekkür 11

1 Mekân Hakkında Düşünmek 15

2 Işığın Yolları 20

3 Kendi Şeklimizi Hissetmek 57

4 Beyin Haritaları ve Benekler 73

5 Sherlock Kulaklar 113

6 Harita ve Sayaçlar Eşliğinde Hareket 144

7 Güneş Gözlükleriniz Samanyolunda 160

8 Bir Yerlere Gelmek 173

9 Mekân ve Bellek 183

10 Düşünmek Üzerine Düşünmek 196

Notlar 209

İllüstrasyonlar 215

Dizin 219

Teşekkür

BİLİMSEL ARAŞTIRMALAR toplum sayesinde mümkündür. Bir sinirbilim laboratuvarında bir günlük çalışmadan hemen sonuç elde edilmez: Bu, içinde yaşadığımız kültürün bilimsel bilgiye verdiği değerle mümkün olabilir ancak. Bu kitapta yer alan veriler ekonomik destekle ortaya çıkabildi: vergilerden ayrılan araştırma fonları, akademisyenlerin maaşlarını karşılayan eğitim harçları ve ticari kârlardan hayır işleri için kesilen paylar sayesinde. Toplumsal destek ekibinin bir üyesi olarak yaptığınız katkılardan dolayı ilk teşekkürü siz okurlar hak ediyorsunuz.

Bu kitabın yazılmasını mümkün kılan çeşitli mali kaynaklara teşekkür etmek isterim. John Simon Guggenheim Vakfı'nın verdiği burs, düşünmek ve yazmak için gerekli olan çok değerli bir zaman sağladı bana. Ulusal Bilim Vakfı'ndan gelen hibe kitabın yazım aşamasında bana hem zaman kazandırdı hem de kitabın konusuyla ilgili bir online kurs için ("Beyin ve Mekân") müfredat hazırlamamı sağladı. Ulusal Sağlık Enstitüleri, Ulusal Bilim Vakfı ve özel kurumlardan gelen hibe yardımları, kitapta tarif ettiğim laboratuvar araştırmalarıma destek oldu. Duke Üniversitesi, bu kitap projesiyle sinerjik bir ilişki içinde olan eğitim ve araştırma faaliyetleri için fon ve organizasyon konularında destek sundu.

Kitabın sayfalarında yazanlara gelince, bunlar için harikulade bir serbest editör olan Suzanne Bolt'a çok teşekkür ederim. Suzanne kollarını sıvadı ve kitabı baştan sona en ince ayrıntısına kadar okudu. Kitaptaki argümanların yapısı ve fikirlerin sıralanışıyla ilgili dü-

şünceleri ikna ediciydi, sözcükleri kullanışındaki maharet ise müthişti. Onun önerilerinden çok şey öğrendim. Çok fazla edatın kullanıldığı cümlelere rastlarsanız, onlar bana aittir. Suzanne elinden geleni yaptı.

Bilişsel teoriler konusunda birçok meslektaşımdan yardım aldım. Bilişsel dilbilimci (ve araştırma ortağım) Edna Andrews, mekân algısıyla dil arasındaki ilişkiye dikkatimi çekti ve düşüncelerimi şekillendiren birçok tartışmada yer aldı. İşitsel sinirbilim uzmanı David Poeppel kendisiyle görüşmek istediğimde bana daima ayıracak bir zaman buldu. David birçok önemli bulgu ve argüman konusunda bana çeşitli öneriler sundu ve kitabın birçok bölümüne dair eleştirilerini dile getirdi. Yazdığım şeylerin hepsine katılmayacaktır muhtemelen, ama onları merak uyandırıcı bulacağını umarım. Bilişsel bilimci Rafael Nunez, kendisi her ne kadar farkında olmasa da, mekân ile düşünce arasındaki ilişki konusuna dikkatimi çeken ilk kişilerden biriydi, daha sonra onunla bu fikirleri tartışma zevkini yaşadım.

Bu kitabın ortaya çıkışında, gerek sınıfta gerekse laboratuvarda birlikte çalışma zevki tattığım lisans, lisansüstü ve doktora sonrası eğitimi gören birçok parlak öğrenci ve teknisyenin emeği var. Bu öğrencilerin bu kavramlar için bir tartışma ortamı yaratılmasındaki rolleri büyük. Çoğu bu kitabın sayfaları arasında yer alan bilimsel bulgularda pay sahibi; bir o kadarı da, yer darlığından dolayı sözünü edemediğim ama kitabın içeriğine yön veren aynı şekilde ilginç araştırmalara katkıda bulundu. Ama laboratuvar yöneticileri Abigail Underhill, Jessi Cruger ve Karen Waterstradt olmasaydı bu araştırmaların hiçbiri gerçekleşemezdi.

Birçok arkadaşım ve meslektaşım kitabı gözden geçirdi ve hatalarını yakaladı. Barbara Shinn-Cunningham, Stephen Lisberger, Richard Johnson, Kambiz Zangi ve Henry Greenside'a, zaman ve emek harcayıp teknik ve bilimsel konuları en ince ayrıntısına kadar inceledikleri için teşekkür ederim. CVNet ve Auditory adlı sinirbilim mail listesindeki katılımcılar ilgili literatür hakkında, özellikle de Kepler'in optik alanındaki katkıları (2. Bölüm) ve pili zayıflamış duman dedektörü sinyalinin gizemi (5. Bölüm) hakkında önemli yorumlarda bulundular ve bana yol gösterdiler.

Bu kitabın ortaya çıkmasına vesile oldukları için birçok dostuma müteşekkirim. Sofie Kleppner yıllardır tanıdığım bir yazışma arkadaşım. Onun verdiği destek ve cesaretin benim için taşıdığı anlamı kelimelerle ifade edemem. Sofie'nin benimle beraber bir kitap projesinde yer alma konusundaki istekliliği, kitap yazma planımın gerçeğe dönüşmesinde çok önemli bir rol oynadı.

Kuzey Carolina Üniversitesi pediatri bölümünde öğretim üyesi ve araştırmacı olarak çalışan Eliana Perrin'le kitabın gelişimi hakkında çok sayıda hoş sohbetlerimiz oldu. Onun kullandığı o müthiş bilim dilini kitapta muhafaza etmeye çalıştım.

Victoria Templeton'ın bu kitaptaki fikirler konusunda bana paha biçilmez yardımları oldu ve bir sonraki kitap için gözlerimde parıltılar oluşmasını sağladı. Victoria'yla yaptığım konuşmalar zihnimi açtı, onun o engin bilgisinden yararlanma fırsatını elde ettiğim için kendimi şanslı addediyorum.

Bu kitaptaki birçok fikir konusunda Michael Platt ve Elizabeth Brannon'ın görüşlerine başvurdum. Zekâları kadar dostlukları da çok değerli benim için.

Uygulamalı çalışan sinirbilimciler bilimsel makaleleri kitaplara tercih ederler. Çiçeği burnunda bir kitap yazarı olarak Kuzey Carolina Üniversitesi sosyologlarından Andrew Perrin'den yardım aldım. Andy, kitabın planlanması, yazılması ve basılması aşamalarında bana öneri ve yorumlarda bulundu. Yorumları paha biçilmezdi, metni alanım dışındaki okurlara göre ayarlamamda ve kitabı rayına oturtmamda bana yardımcı oldu. Ortak dostumuz Eric Schwartz da kitabın yayım aşamasına rehberlik etti, kitapta yer alan fikirlerle ilgili tartışmalarımızdan hem çok keyif aldım hem de çok yararlandım.

Doktora sonrası eğitimimdeki ilk danışmanım Bill Newsome'a ve eşi Brie Linkenhoker'a müteşekkirim. Bill'in destekleri bu kitap projesine başlamamda bana cesaret verdi. Kitaba yanlış başlangıçlar yaparak geçen birkaç ayın ardından Bill ile Brie'nin evlilik törenleri için yaptığım yolculuk bana kitaba doğru başlamak için gerekli teşviki sağladı.

Harvard University Press'e ve kitabın yayımlanma sürecinde görev alanlara emekleri için teşekkür ederim. Editörüm Michael Fisher'a, kitabın başından yayımlanma aşamasına kadar paylaştığı öne-

ri ve yorumları için teşekkür ederim. Kitabın ortaya çıkışında onun coşkusunun, cesaretlendirmelerinin ve espri anlayışının payı büyük. Lauren Esdaile, çeşitli evrelerinde kitabın seyrinde etkili bir rol oynadı. Kate Brick ve Kate Mueller kitabın sırıtan yerlerini törpüledi; çok fazla dipnot varsa bunun sorumlusu benim.

İki muhteşem bilim sanatçısı, Rob Flewell ve Marian Miller, benim çöp adam çizimlerimi harika resimlere dönüştürdüler. Üstelik bunu, zaman sınırlaması nedeniyle gece gündüz çalışarak gerçekleştirdiler. Onlara ve illüstrasyonlar, kitabın sayfa düzeni ve tasarımı üzerinde çalışan Lisa Roberts, Eric Mulder ve Peter Holm'a teşekkür ederim.

İsimlerini bilmediğim iki tashihçi zaman ayırıp kitabın taslağını baştan sona okudu. Yapıcı ve derinlikli yorumları benim için çok değerliydi.

Son olarak aileme (çekirdek ve geniş aileme) minnettarlığımı hararetle belirtmek isterim. Kimi zaman yorumlarıyla, kimi zaman da gösterdikleri ilgi ve alakayla, eleştirileriyle veya düşünmek ve yazmak için bana zaman tanıyarak bu kitaba çok önemli bir katkıda bulundular. Onlara ne kadar teşekkür etsem azdır.

1

Mekân Hakkında Düşünmek

BEYİN GÜCÜNÜZÜN onda dokuzu nesnelerin yerini belirlemeye harcanır. (Aslında bu sayıyı kafadan attım. Ama doğru olabilir. Sabrınızı rica ediyorum.)

Şu anda nesnelerin nerede olduğu konusunda neler bildiğinizi düşünün. Kahve kupanızın masanın üzerinde, önünüzde durduğunu, kedinin halının üzerine kıvrılmış halde yattığını ve güneşin pencerenizden içeri girdiğini görebilirsiniz. Kulak kabarttığınızda bir köpeğin havladığını veya bir arabanın evinizin önünden geçip gittiğini duyabilirsiniz. Arabanın hangi yöne doğru gittiğini ve köpeğin hangi komşunuza ait olduğunu anlayabilirsiniz.

Mekân algınız bu şeylerin nerede olduğu bilgisinin yanı sıra, ne oldukları bilgisini de içerir. Nesneleri şekillerinden tanıyabiliriz: Kahve kupası bir yanında kulbu ve içinde sıcak bir içeceği barındırabilecek bir haznesi olan, üstü açık silindirik bir nesnedir. Şekilleri farklı olduğu için kedi ile kahve kupasını ayırt edebilirsiniz; kedinin kulbu yoktur. Aslında bu şeyleri birbirinden farklı görürüz, çünkü mekân içinde sınırlara sahiptirler. Kedinin nerede bittiğini, halının nerede başladığını görebilirsiniz, çünkü ışık örüntüsü yerden yere (kediden halıya) değişiklik gösterir. Bu mekânsal sınırı algılayamasaydık kedi ile halının farklı varlıklar olduğunu anlayamazdık. Hay-

retler içerisinde halının bir parçasının ayağa kalkıp miyavlamaya başladığını görürdük.

Konum ve sınır bilginiz fiziksel nesnelerle baş etmenizi ve dünya içinde hareket etmenizi sağlar. Elinizi uzatıp kahve kupasını veya kediyi kaldırabilirsiniz ve bunu yaparken elleriniz o nesneyi kavramak için belli bir şekle bürünür. Sehpanın etrafından bacaklarınızı çarpmadan (genellikle) yürüyebilirsiniz.

Bu kitap, beynin algı ve davranışla ilgili bu sıradan becerileri gerçekleştirmenize yardımcı olan o muhteşem işlem gücünü konu alıyor. Gözlerinizin nasıl radyo gibi çalıştığını, kulaklarınızın nasıl zamanı bildiğini ve kafanızın içinde nasıl gerçekten taşlar (yukarının neresi olduğunu anlamanızı sağlayan minik taşlar) olduğunu anlatıyor.

Bu kitapta aynı zamanda şu sorular da ele alınıyor: Nerede olduğumuzu nasıl biliriz? Bir yerden bir yere nasıl gider ve geri dönüşte neden genelde kısa yolu seçeriz? Neden yolcu olarak gittiğimiz yerleri araba kullanırken gittiğimiz yerler kadar rahat bulamayız? Bir şey yapmak üzere harekete geçip de ne yapacağımızı unuttuğumuzda, başlangıç noktasına gitmek o şeyi hatırlamamıza neden yardımcı olur?

Bu kitapta duyularımızın fiziksel enerjiyi (ışık, ses ve ten üzerindeki baskı gibi) nasıl ölçtüğünü ve beynin çevremizdeki nesnelerin konumları ile çevremizde olup bitenler hakkında çıkarımlarda bulunmak için bu ölçümleri nasıl değerlendirdiğini anlatacağım. Gözlerimizin elektromanyetik radyasyonu (radyoların algıladığı ama farklı dalga boyuna sahip enerjiyi) nasıl algıladığını açıklayacağım. Beynimiz, sesin iki kulağımıza ulaşımı arasındaki zamansal farkı (saniyenin 1/1000'inden daha kısa bir zaman aralığını) ölçerek sesin nereden geldiğini anlayabilir. Kafamızın içindeki küçük taşlar da kulaklarımızın denge organları içindedir; bu minik çakıltaşları, konumumuzu değiştirdiğimizde çalkalanarak bedenimizin konumunu yerçekimine göre denetlememize yardımcı olur.

Fakat bu hikâye sadece duyularla değil, hareketle de ilgili. Fiziksel eylemlerimize duyusal girdiler kılavuzluk eder, mekân içinde hareket etmemizi sağlar ve neyin nerede olduğunu anlamamıza yardımcı olur. Örneğin, gördüğümüz nesnelerin konumlarıyla ilgili al-

gımız, gözlerimizin nereye baktığıyla ilgili bilgiyi gerektirir ve bu bilginin gözlerimiz her hareket ettiğinde ve retina üzerindeki ışık örüntüsü her değiştiğinde güncellenmesi gerekir. Bu cümleyi okurken, gözleriniz sözcüklerden sözcüklere atlarken görsel konum algınız altı kez, belki de daha fazla güncellenmiştir. Sözcükleri atlarken dünya zıplıyormuş gibi gelmez size, çünkü beyniniz hareket edenin gözleriniz olduğunu bilir. Bu güncelleme işlemi beyninizin *sizin* hareketlerinizi denetlemesini gerektirir. Sizi başkası hareket ettirdiğinde (bir arabada yolculuk ederken örneğin) beyniniz güncelleme işlemini iyi yapamaz, bulunduğunuz yerle ilgili algınızın sürekliliğini sağlamakta ve eve nasıl döneceğinizi kestirmekte zorluk çekersiniz.

"Nerede" bilgisi farklı zaman ve mekân hesaplarının yanı sıra hem dışarıda ne olduğu hem de o ortamda nerede olduğunuz algısını içerir. Belli bir anda görebildiğiniz, duyabildiğiniz ve hissedebildiğiniz şeyler, bulunduğunuz yere gitmek için yaptığınız hareketler, o hareketlerle ilgili anınız ve o bölge hakkındaki coğrafi bilginiz, hepsi dünya içindeki konumunuzla ilgili algınıza katkıda bulunur. Beyninizin farklı duyu ve motor sistemlerinin hepsi birlikte çalışarak bu duyuyu yaratır. Belleğiniz ve bilginiz nerede olduğunuzu anlamanızda size yardımcı olmakla kalmaz, bulunduğunuz yer de anıları ve bilgiyi harekete geçirir. Alışveriş listenizdekileri unuttuğunuzda tekrar mutfağa gitmek, ne pişirmeyi planladığınızı hatırlamanızda size yardımcı olacaktır.

Bu kitaptaki yaklaşım biçimi hesaplamalı (*computational*) ve deneysel sinirbilimci geçmişimden kaynaklanıyor. Beyni "Nasıl inşa edilmiş? Neler yapabiliyor?" bakış açısıyla incelenebilecek ve anlaşılabilecek bir şey olarak görüyorum. Bir deneysel sinirbilimci olarak, öğrencilerimle birlikte beyindeki nöronların farklı duyu uyaranlarının varlığındaki ve farklı davranışlar sırasındaki faaliyetlerini ölçmek için deneyler yaptım. Bir hesaplamalı sinirbilimci olarak ise, farklı nöronların bir şeyleri çözmek (örneğin duyusal olaylarla ilgili çıkarımlarda bulunmak veya bu olaylara tepki olarak harekete geçmeleri için kaslara sinyal göndermek) amacıyla nasıl bir araya gelebileceğini hayal ediyorum. Bunlar beynin hesaplama yapış biçimini gösteren modellerin temelini oluşturuyor.

Beyni biyolojik bir hesaplama aygıtı olarak tasarlayan bu görüşün kitaba gizemden arındırıcı bir özellik kattığını ümit ediyorum. Yani, tam olarak ne bildiğimizi ve nasıl bildiğimizi açıklamaya çalışıyorum. Tekil nöronların nasıl çalıştığını ve nöron popülasyonlarının ortamdaki duyusal olaylara nasıl yanıt verdiğini büyük oranda anlıyoruz. Nöronların tepki verme biçimleri, nasıl algıladığımız konusunda bize fikir veriyor. Örneğin, görme yollarındaki nöronların nesnelerin sınırlarını belirleme konusunda en donanımlı nöronlar olduğu anlaşılıyor. Onların bu özelliğinin kediyi zemindeki halıdan ayırt etmemize yardımcı olduğu düşüncesindeyiz.

Bir sistemle aynı şeyi yapabilen başka bir sistem inşa edebildiğimizde, onun nasıl çalıştığını tam olarak anladığımızı biliriz. Bugün bilimin ulaşmayı arzuladığı son nokta tam da bu. Örneğin, mühendisler insan gözünden çok daha yüksek çözünürlükte kameralar ve devasa verileri muazzam bir hızda depolayıp işleyebilen süper bilgisayarlar yaptılar. Ne var ki bilgisayarlar artık düzenli olarak hava tahminleri yapabilseler ve insanları satrançta yenseler bile, anneniz güneş gözlüğünü taktığında onun aynı kişi olduğunu anlayamazlar, ki kafanızın içindeki biyolojik bilgisayar için çok kolay bir iştir bu. Beynin eldeki ham veride aralarında çok az benzerlik bulunmasına rağmen iki şeyin aynı şey olduğunu çıkarsama yeteneği (açık ton, koyu ton ve rengin mekânsal örüntüsü gibi) muhteşemdir, beynin bunu nasıl başardığını ise bilmiyoruz. "Bu nasıl inşa edilir" yaklaşımı bilgimizdeki bu boşlukların tanımlanmasında bize yardımcı olabilir.

Genel olarak, bu kitaptaki hesaplama ağırlıklı ton, sinirbilimle ilgilenmeye başladığım sıralarda ilgimi çeken konuların etkisini taşıyor. Bana göre bilimdeki en ilgi çekici sorun, nöral ateşleme örüntülerinin *düşünceyi* nasıl oluşturduğu sorunudur. Düşünme, tahayyül etme, muhakeme, endişelenme, arzulama, planlama, hatırlama ve karar vermeden oluşan o zengin zihinsel hayatımızın beyin içindeki mikroskobik hücrelerin oluşturduğu elektrik sinyallerinde nasıl vücut bulduğunu hep öğrenmek istemişimdir. Bu kitap bunun cevabını vermiyor ama güçlü bir analoji sunuyor: Beynin ölçebildiğimiz şeylerle (duyusal uyaranlar gibi) ilgili bilgiyi nasıl işlediğini kavrayabilirsek, ölçemediğimiz şeyleri (fikirler gibi) nasıl işlediği konu-

sunda bilgi sahibi olabiliriz belki. Somut şeylerle ilgili muhakemelerin nöral mekanizmaları ile soyut şeylerle ilgili muhakemelerin nöral mekanizmaları birbirine benziyor olabilir. Beynin mekân hakkında düşünme faaliyetini yöneten sistemler belki de beynin bizatihi *düşünme* faaliyetini yöneten sistemlerdir.

Beynin onda dokuzu tahmini hiç de abartılı bir tahmin gibi görünmüyor neticede...

2

Işığın Yolları

GEÇENLERDE bir grup arkadaşıma hangi duyularından en kolay vazgeçebileceklerini sordum. Çoğu kokuyu seçti. Görme duyusunu seçen olmadı.

Görme duyunuzu kaybettiğinizde nesnelerin yerini bilmenizi sağlayan en önemli duyunuzu kaybetmiş olursunuz. Görme duyusu nesnelerin şekillerini ve çevremizdeki dünya içindeki düzenlerini algılamamızı sağlar; neredeyse yaptığımız her şeyi etkileyen bir yetenektir bu. Annenizi tanımak, onun gözlerinin, burnunun ve ağzının ona özgü bir oran ve düzende biçimlendiği bir yüzü olduğunu görmeyi gerektirir. Bu sayfadaki sözcükleri okumak, her bir sözcüğün açık ve koyu bölgelerinin ayrıntılı biçimde haritasını çıkarmayı gerektirir. Beynin bir mekân algısı oluşturmasındaki önemi bakımından görme, duyu sistemlerimiz içinde ayrı bir yere sahiptir.

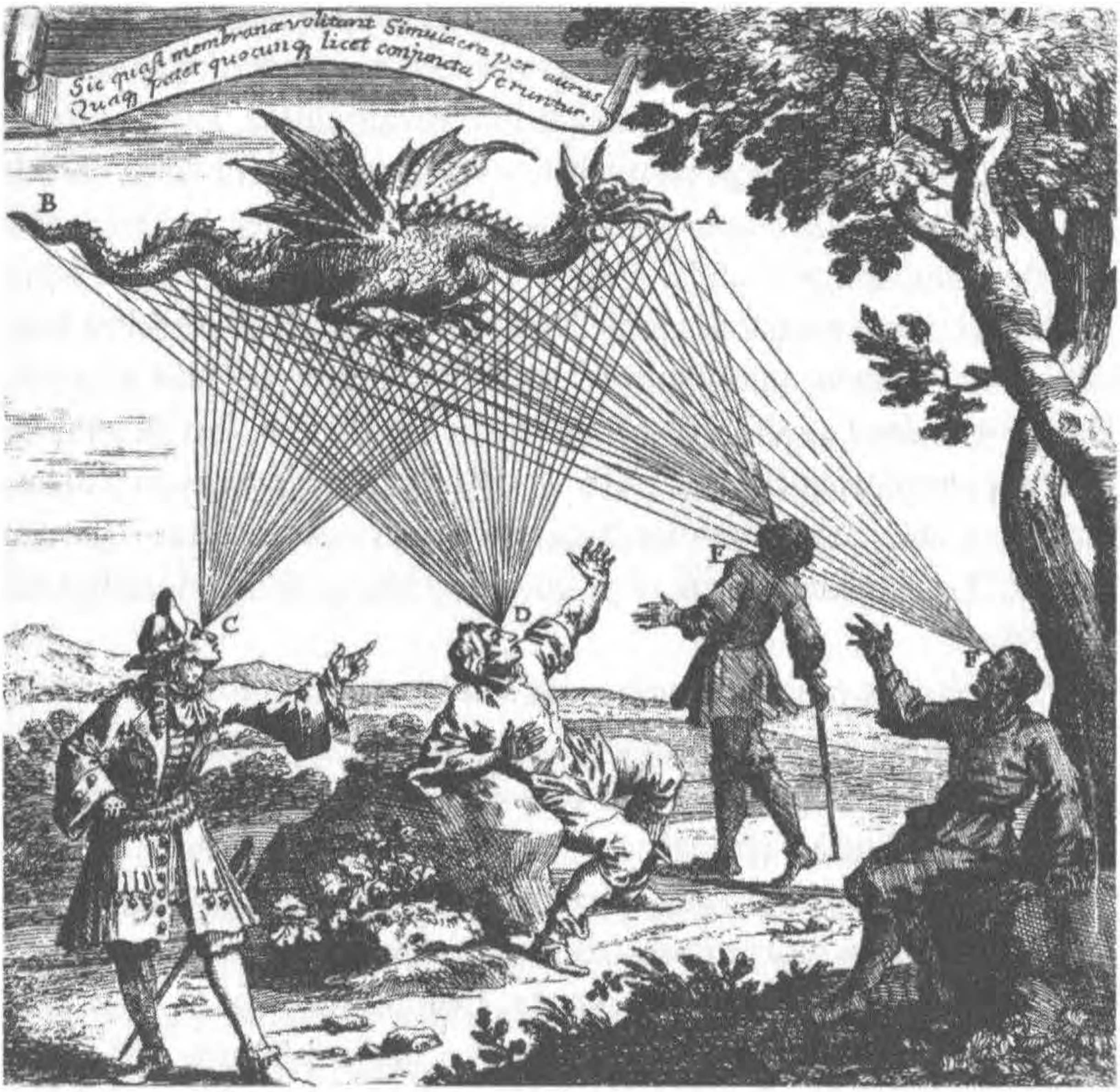
Görme mekanizmalarıyla ilgili tartışmaların en az iki bin yıllık bir mazisi var. Bugün görmeyle ilgili araştırmalar psikoloji ve sinirbilimin alanına girse de, her zaman öyle olmamıştı. Demokritos, Platon, Öklit, İbn-i Heysem, Leonardo da Vinci, René Descartes ve Johannes Kepler gibi felsefeciler, matematikçiler, sanatçılar ve gökbilimciler günümüz görme biliminin temel taşlarını ördüler. Bu âlimler, gözün temel çalışma özelliklerini anlayabilmek için hayal güçlerini kullandılar, gözlem yaptılar, mantıksal çıkarımlarda bulundular ve nihayet ölçümler yaptılar.

Antik Yunan filozofları görmenin nasıl gerçekleştiğiyle ilgili tartışmaları başlattıklarında, evrenin enerji ve maddeden oluştuğu yolundaki modern görüşün desteğinden yoksundular. Dünyanın ve üzerindeki her şeyin dört elementin –toprak, ateş, hava ve su– farklı karışımlarından meydana geldiğini düşünmekteydiler. Yaklaşık MÖ 450'de Demokritos ve diğer filozoflar bütün maddelerin atom adını verdikleri minik parçacıklardan oluştuğu teorisini geliştirmeye başladılar. Bu atomlar maddenin en küçük birimiydi ve bölünemezdi. Bunlar maddeye özelliğini vermekteydi: Suyun atomları akışkandı, havanın atomları hafif ve şeffaftı vs. O dönemlerde yaşayan Yunanlılar için (takip eden yüzyıllarda da) akılları en çok meşgul eden soru şuydu: "Gözler tam olarak neyi görüyor? Hangi fiziksel varlığı algılıyorlar?"

Demokritos yeni filizlenen atom teorisinden bir görme mekanizması tasarladı: Görsel sahnedeki nesnelerden küçücük bir madde yayıldığını ve bu maddenin gözün içine girdiğini ileri sürdü. Bu madde, görsel sahne içindeki maddelerden ateşin duman ve sıcaklık vermesi veya yılanın deri değiştirmesi gibi sızmakta veya dışarı atılmaktaydı.[1] Sürekli dışarı salgılanmak zorunda olan bu madde, gerçek maddenin aksine hiç bitmiyordu. Demokritos'a göre bu madde göze girdiğinde bir şekilde kaynağının temel karakterini (hacmini, şeklini, rengini) koruyordu ve göz onu dokunma duyusu gibi hissediyordu.

Demokritos görmenin temel yönünü doğru kavramıştı: Bu görme tozu her ne ise, nesne*den* göz*e* doğru hareket ediyordu. Bu teori nesne-ışın (veya *intromisyon*) teorisi adıyla bilinir. Diğer Yunan filozofları ise bu süreci tersine çevirdiler. Örneğin Platon, dışarıdaki maddeden değil de gözden bir görsel güç yayıldığına (bir çizgi roman kahramanının gözlerinden çıkan süper ışınlar gibi) inanmaktaydı. O da dokunma ile görme arasında paralellik kurmuş ama görmenin *ekstramisyon* adı verilen ve içeriden dışarıya doğru gerçekleşen bir işlem olduğunu vurgulamıştı.

Göz-ışın (ekstramisyon) ile nesne-ışın (intromisyon) arasındaki tartışmanın karara bağlanması bin yıldan fazla sürecekti (Şekil 2.1). Greko-Romen İmparatorluğu gerilemeye başladığında Yunan filozofların eserleri karanlığa gömüldü. Ama sonrasında İslam dünya-



Şekil 2.1 Antik Yunanlı âlimler görmenin göze bir şeylerin girmesiyle mi yoksa gözden bir şeylerin çıkmasıyla mı gerçekleştiği konusunda tartışmalar yürüttüler. Platon gözün dünyayı "hissetmek" için bazı ışınlar yaydığını düşünmekteydi. Demokritos, daha sonra da İbn-i Heysem bunun tam tersinin doğru olduğunu düşündü. On yedinci yüzyılın ilk yarısında Kepler'in çalışmalarına kadar gözün görsel sahnenin bir imgesini oluşturma sürecinin optik temeli tam olarak anlaşılamadı. Bu 1685 tarihli çizim görmenin nasıl gerçekleştiğine dair yeni yeni ortaya çıkan kavrayışı tasvir ediyor.

sının yükselişi bu tür entelektüel uğraşları yeniden canlandırdı ve bu eserler yeniden keşfedilerek Arapçaya çevrildi.

Önceleri göz-ışın görüşü egemenliğini sürdürdü. Ebu Yusuf Yakub bin İshak el-Kindî ve Hunayn bin İshak gibi Müslüman âlimler göz-ışın teorisinden yana saf tutmuşlardı; bunun en temel nedeni nesne-ışın teorisinin ilk formülasyonunda kusurlar olmasıydı. Özellikle Demokritos'un görme kavramının bir çeşit maddi parçacık içe-

riyor olması işi karıştırıyordu. Eğer bu parçacıklar gözün içinde "hissediliyor" ve örneğin nesnenin hacmine dair bilgi taşıyorlarsa, bunların görünen nesnenin hacminde olmaları gerekmez miydi? Dağ gibi büyük nesneler küçük gözlerin içine nasıl giriyordu o zaman? Ayrıca aynı nesne aynı anda ona bakan birçok kişinin gözüne nasıl girebiliyordu? Açıklanmaya muhtaç konulardı bunlar.

Bu âlimler kavramsal olarak, günümüz görme biliminin odağı olmayı sürdüren bir noktayı fark etmişlerdi: Görme dünyanın *bize yaptığı* bir şeyden ziyade *bizim dünyaya yaptığımız* bir şey gibi görünebilir. Pasif bir biçimde arkamıza yaslanıp bütün manzaranın gözümüzün önünden geçmesini izlemeyiz. Çevremize göz gezdirir, ilgimizi çeken farklı nesneleri inceleriz. Gözlerimizi hareket ettirdikçe önümüzdeki sahnenin görünüşü değişir. Baktığımız şeyi çok net görürüz ve sahnenin doğrudan bakmadığımız kısımlarını pek fark etmeyiz. Bu âlimler, görme sahneden otomatik olarak yayılan şeylere bağlıysa gözlerimizi hareket ettirmenin gördüğümüz şeyi neden etkilediğini sorgulamaya başladılar. Bu tür gözlemler nesne-ışın teorisinin aleyhine çalışıyor gibiydi ve sahneyi hissetmek için gözlerden ışın yayıldığı düşüncesiyle daha tutarlıydı.

Bu mesele nihayet ilk binyıl sona erdikten yirmi-otuz yıl sonra çözülmeye başladı. Yaklaşık MS 1028 ile 1038 yılları arasında, Batı'da Alhazen adıyla tanınan Ebu Ali el-Hasan ibn-i el Hasan ibn-i el Heysem, nesne-ışın teorisini diriltip tekrar elden geçirdi.* İbn-i Heysem, Yunan âlimlerinin nesne-ışın ve göz-ışın teorilerine karşı çıktı ve kendi teorisini öne sürdü. Göz-ışın teorisini savunanların argümanlarını mantıksal argümanlarla reddetti. Platon ve diğer göz-ışın teorisi savunucuları, gözün içinden bir şeylerin çıkıp ışıkla birleştiğini ve tekrar göze döndüğünü ileri sürmüştü. İbn-i Heysem,

* İbn-i Heysem ilginç bir hayat sürmüştü. Bir süre Basra veya Mısır'da devlet memurluğu görevinde bulunmuş, sonra idari yükümlülüklerinden kurtulmak için deli numarası yapmıştı (bugün dünya genelinde bazı üniversitelerin fakültelerinde komisyon çalışmalarından kurtulmak için sıkça başvurulan bir stratejinin ilk örneği olabilir). İbn-i Heysem hastalık numarası yaptığı için ev hapsinde tutulurken felsefi çalışmalarına odaklanmak için bol zaman bulmuş, matematik, astronomi, metafizik, mantık, tıp ve optik gibi çeşitli konularda 180'den fazla yazı kaleme almıştı.

kritik evre göze dönüş evresi olduğu için baştaki yayılmayı (emanasyon) koyutlamanın gereksiz olduğunu ileri sürdü. Göz-ışın teorisinin bu kısmı kanıtlanamazdı, görmeyle ilgili bilinen özelliklerin hiçbirini açıklamıyordu, dolayısıyla reddedilmesi gerekiyordu. İbn-i Heysem, Demoktritos'un toz temelli nesne-ışın teorisini benimsemek yerine görmenin temel bileşeninin ışık olabileceği ihtimaline ağırlık verdi.

İbn-i Heysem neyin görüneceğini, neyin görünmeyeceğini ve görünen nesnenin nasıl bir hissiyat yarattığını ışığın belirlediğini vurguladı. Güneşe bakmanın yoğun ağrıya neden olduğunu, parlak bir nesneye uzun süre baktıktan sonra göz başka yöne çevrildiğinde gözün önünde bir süre o nesnenin hayalinin belirdiğini (günümüzde flaşlı fotoğraflarda yaşadığımız şey) belirtti. Yıldızların gece görünürken gündüzleri görünmediğine işaret ederek şöyle dedi: "İki zaman arasındaki tek fark, gözlerimizle gökyüzü arasındaki havanın gündüz aydınlık, gece karanlık olmasıdır."[2] Keza, ateşböcekleri geceleri parlıyor ama gündüzleri fark edilmiyordu. Basılı küçük yazılar gibi ince ayrıntılar iyi aydınlatıldığında çok net görülebilmekte ve nesnelerin renkleri ışığın gücüne göre değişmekteydi. İbn-i Heysem, maddi bir emanasyonu içeren tartışmayı ışığı içeren bir olaya doğru kaydırarak görme bilimini doğru yola sokmuştu.

BUGÜN ARTIK ışığın madde değil bir enerji biçimi olduğunu biliyoruz. Işık elektromanyetik radyasyondur, bütün çevremizde bulunan bir çeşit enerjidir (bkz. s. 105, Resim 1). Örneğin, elektromanyetik radyasyon radyolarla, röntgen cihazlarıyla, mikrodalga fırınlarla ve başka birçok cihazla da iletilir. Öte yandan, ne kontrol noktasında pusuda bekleyen polis memurunun hız radarından çıkan ışınları görebiliriz, ne de radyo verici antenlerinin veya mikrodalga fırınların yaydığı dalgaları algılayabiliriz. Neden? Bütün bu durumlarda aynı enerji biçiminin yer aldığı düşünüldüğünde son derece kafa karıştırıcı bir durumdur bu.

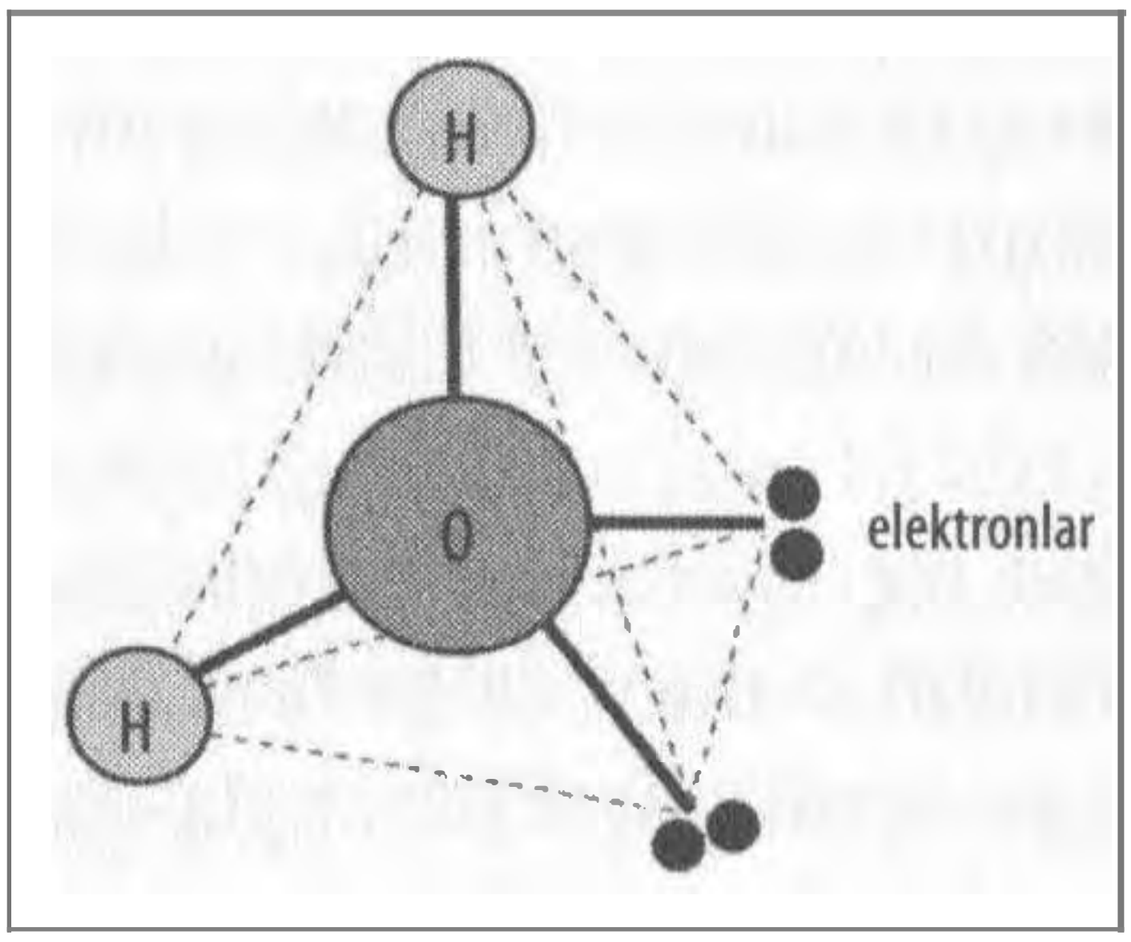
Cevap ışığı algılayan biyolojik mekanizmalarda yatıyor. Gözün arka kısmında, retinada *fotoreseptör* adı verilen ışığa duyarlı nöronlar dizilidir. Fotoreseptörler ışığı sezme özelliklerini *fotopigment* adıyla bilinen özel moleküllerden alırlar. Fotopigmentler, belli dalga

boylarındaki ışığı yansıtmaları ve diğerlerini emmeleri bakımından boyaya benzerler. Boya pigmentlerinde, yansıtılan dalga boyları boyaya rengini verir. Fotoreseptör pigmentlerinde ışığı emme, elektromanyetik spektrumun dar bir aralığı içinde gerçekleşir, yani 400 ila 700 nanometre civarı dalga boylarına sahip elektromanyetik radyasyonla sınırlıdır. Radyo, cep telefonu, mikrodalga fırın veya trafik radarı sinyalleri bu aralığın dışında dalga boylarına sahiptir. Bu sinyalleri fotopigment molekülleri, dolayısıyla da bizler göremeyiz. Farklı fotopigment moleküllerine sahip hayvan türleri, örneğin bazı kuş türleri ile arılar, bu aralığın dışında ama ona yakın aralıklardaki, yani 300 nanometrelik elektromanyetik radyasyonları (kızılötesi ışınları) görebilirler.

Fotopigment molekülleri bir çeşit mikroskobik ışık anahtarı gibi, ışığın aktive edebildiği bir anahtar gibi hareket eder. Bu yetenek, fotopigment moleküllerinin şeklinden ve ışığı emdiklerinde şekillerinin *değişime uğrama* biçimlerinden kaynaklanır. Fotopigment gibi karmaşık bir molekülün görünüşünü gözünüzde canlandırmanız için bazı ilkeleri basit bir molekülün, yani suyun şekliyle ilgili bilgilerimiz üzerinden tarif etmeye çalışacağım.

Bir molekülün şeklini onu oluşturan atomlar ve bu atomların birbiriyle kurdukları bağlar belirler. Su molekülleri bir oksijen atomu ile iki hidrojen atomunun (Şekil 2.2) birbirine sırasıyla hidrojen-oksijen-hidrojen biçiminde bağlanmasından meydana gelir. Bu atomları sicim üzerine dizilmiş boncuklara benzetebiliriz. Atomları birbirine bağlayan bağlar, bu bağları oluşturan elektronların ve komşu elektronların ihtiyaç duyduğu "hareket alanı"nın belirlediği açılar oluşturularak biçimlenir.

Fotopigment molekülleri su moleküllerinden çok daha büyük ve karmaşıktır ama aynı ilkeler onlarda da geçerlidir. Fotopigment molekülleri birçok atomdan oluşur, bu nedenle birçok bağ ve açı söz konusudur. Her fotopigment molekülü karbon atomu zincirlerinden meydana gelir ve aralarında kurdukları bağlarla bir arada duran bu atomlar molekülün omurgasını oluşturur. Her karbon dört bağ oluşturabilir. Dolayısıyla bu zincirde bağların en az ikisi her iki taraftaki karbon atomlarınca işgal edilir, kalan bağlar ise başka hidrojen atomları veya başka karbon atomlarının yan zincirlerince işgal edi-



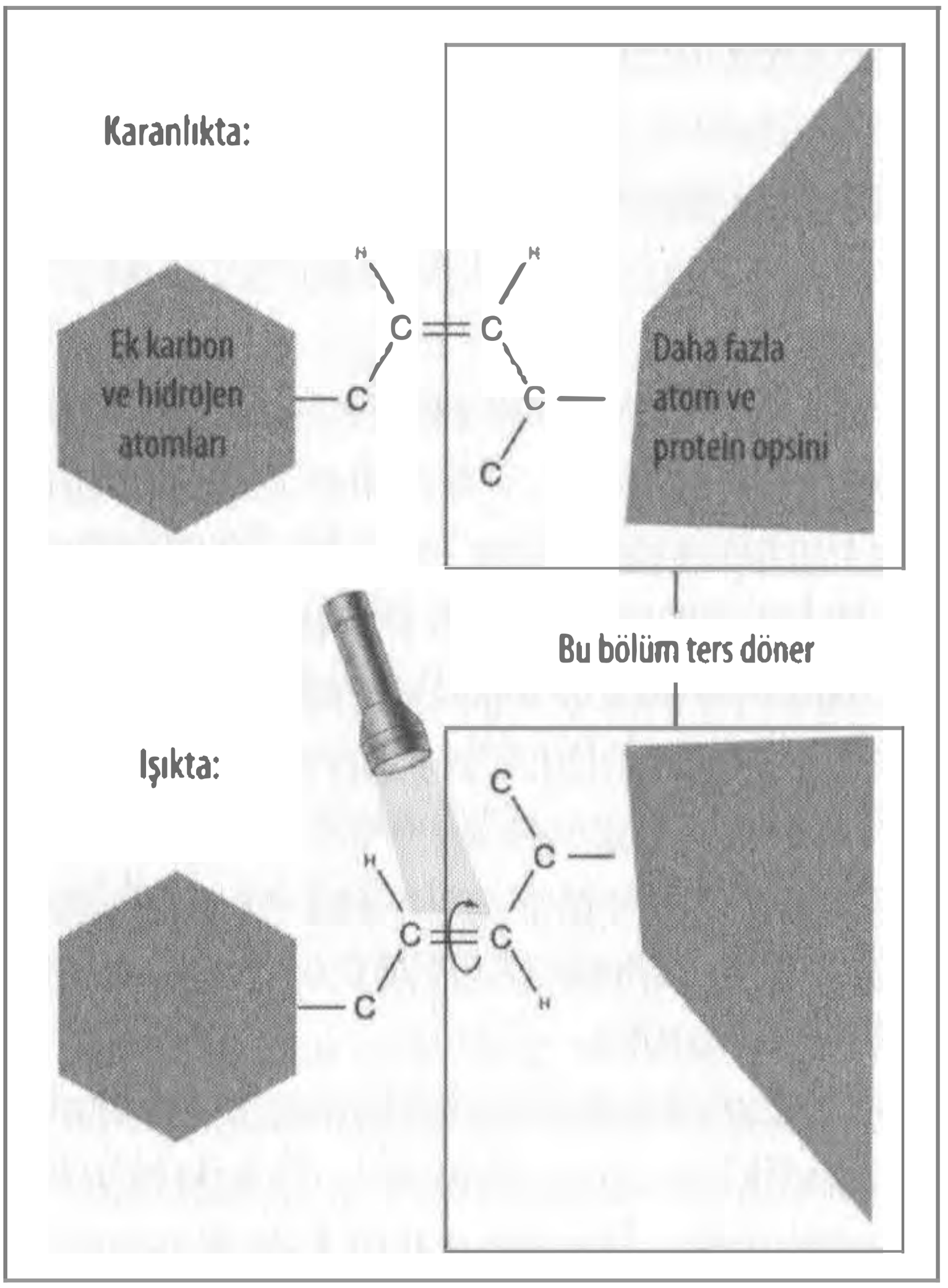
Şekil 2.2 Bir su molekülünün üç boyutlu şeklini tasvir eden şematik çizim. Oksijen atomu (O) hidrojen atomlarından (H) büyüktür. Oksijen atomu bu hidrojen atomlarıyla iki bağ oluşturur ve her bağda hidrojen atomuyla bir elektron paylaşır. Oksijen atomunun diğer dört elektronu birbiriyle ilişkisiz gibi görünen bağlar halinde çiftler oluşturur. Oksijenin hidrojenle kurduğu iki bağ ile iki çift elektronun bir üçgen piramit oluşturduğunu söyleyebiliriz. Böylece her çubuk arasında, olabilecek en büyük alan oluşturulmuş olur.

lir, ortamda rasgele bulunan bir oksijen atomu da buna eklenerek molekülü tamamlar.

Karbon dört farklı komşu atomla, tek bağ olarak adlandırılan dört ayrı bağ oluşturabilir. Bazen iki komşu karbon atomu arasında çift bağ oluştuğu olur. Bu karbon atomlarının her birinin iki "yuva" sını aynı komşu atomun bağı işgal eder. Bu tür çift bağlar tek bağlardan daha güçlüdür. Birbirine tek bağlarla bağlı iki karbon birbirinin etrafında dönebilir. Birbirine çift bağla bağlı olduklarında ise böyle bir şey gerçekleşmez; komşu atomla aralarındaki çift bağ böyle bir hareketi engeller. Fotopigment moleküllerinin karbon zincirlerinde bu tür katı bağlardan çok sayıda bulunur.

Bir kez kurulduğunda, enerji uygulanmadığı sürece bu bağlar bozulmaz. Fotopigmentlerde bu enerjiyi ışık sağlar. Işık fotopigment üzerine düşünce bu katı bağlardan biri bir anlığına bozulur. İki karbon atomu hâlâ birbirine bağlıdır ama tek bir bağ ile. O kısa süre içinde bağ hareket edebilir. İkinci bağ yeniden oluşur ama artık bütün molekül farklı bir şekil almıştır (Şekil 2.3).

Bu iki karbon atomundan birinin siz birinin de dans partneriniz olduğunu düşünün; yüz yüzesiniz ve elleriniz birleşmiş şekilde dans ediyorsunuz. Bir elinizi bıraktığınızda kendi etrafınızda dönebilir-



Şekil 2.3 Gözün fotoreseptörleri içindeki ışığa duyarlı moleküller karbon atomu (C) zincirlerinden ve başka atomlardan meydana gelmiştir. Karbon atomlarından bazıları komşu karbon atomlarına tek bağla (–) bazıları çift bağla (=) bağlıdır. Tek bağlar hareket edebilirken çift bağlar hareket edemez. Işık bu bağlardan birini bozarak geçici bir tek bağın oluşmasına neden olur. Bağ bozulduğunda molekül o bağın ekseninde dönerek molekülün o bölümünün farklı şekilde konumlanmasına neden olur. Çift bağ bu yeni konfigürasyonda yeniden oluşur.

siniz. Tekrar elleriniz birleştiğinde belki de partneriniz sırtınızı görecektir ve artık sola bakan tarafınız önceki pozisyonunuzun sağ tarafına bakar durumdadır. Bu, tek bağ ile mümkün olan dönüş hareketinin temelini oluşturur.

Şimdi de dört elli bir uzay yaratığı olduğunuzu ve dans ettiğinizi, dört elli partnerinizi iki elle tuttuğunuzu, diğer iki elinizi daha fazla dansçı atom zincirini tutmak için kullandığınızı hayal edin. Bir elinizi bırakıp döndüğünüzde bu atom zincirlerini de beraberinizde döndürürsünüz. Dönme hareketinden önce solunuzdaki zincir, part-

nerinizin sağ tarafındaki zincirle, sağınızdaki zincir de onun sol tarafındaki zincirle komşudur. Dönme hareketi gerçekleştikten sonra bu zincirler yer değiştirir. Sizin molekül içindeki mekânsal pozisyonunuz ile diğer tüm atomların mekânsal pozisyonları molekülün şeklini belirler. Dolayısıyla onları döndürdüğünüzde molekülün tamamının şekli değişir.

Bağın bu kısmi bozulması ve peşi sıra yaşanan dönme hareketi ile çift bağın yeniden oluşması, doğrudan ışığın başlattığı görme sürecinin yalnızca bir bölümüdür ve belli bir fotopigment molekülünde böyle bir değişim yaratmak için bir fotonluk ışık yeterlidir. Bir fotopigment molekülünün şeklindeki değişim, sonunda çok sayıda başka molekülü etkileyerek bir fotonun etkisini artırır. Foton bu değişime bir *katalizörde* (kimyasal bir tepkimeyi hızlandıran ama tepkime sırasında değişikliğe uğramayan her tür maddeye verilen genel bir addır bu) değişiklik yaratarak neden olur. Bu işleve hizmet eden proteinlere *enzim* adı verilir.

Enzim gibi katalizörler hızlandırdıkları kimyasal tepkimeler tarafından tüketilmedikleri için sürekli kullanılabilirler. Bir fabrikadaki makineler gibidirler. Bir meşrubat fabrikasının şişeleme bölümündeki makineleri düşünün. Şişe kapağı makinesini önce başlatmak gerekir, çalışmaya başladıktan sonra makine birçok şişeye kapak takabilir. Günün sonunda binlerce şişeye kapak takılmış olur ama makine değişmeden kalır.

Fotopigmentin şeklinin değişmesiyle etkilenen katalizör *opsin* adı verilen bir protein molekülüdür. Diğer protein molekülleri gibi opsin de aminoasit adıyla bilinen unsurlardan meydana gelir. Bir protein içindeki aminoasitlerin sıralanışı (dolayısıyla o proteinin şekli) genlerimizdeki DNA tarafından belirlenir. Bir proteinin bir tepkimeye yardımcı olma yeteneği yapısına bağlıdır; tıpkı şişe ve kapağına uygun şekle sahip şişe kapağı makinesi gibi. Proteinlerin başka moleküllere tutunan bölümlerine *aktif bölge* adı verilir. Proteinin işini yapabilmesi için bu aktif bölgelerin debloke edilmesi gerekir.

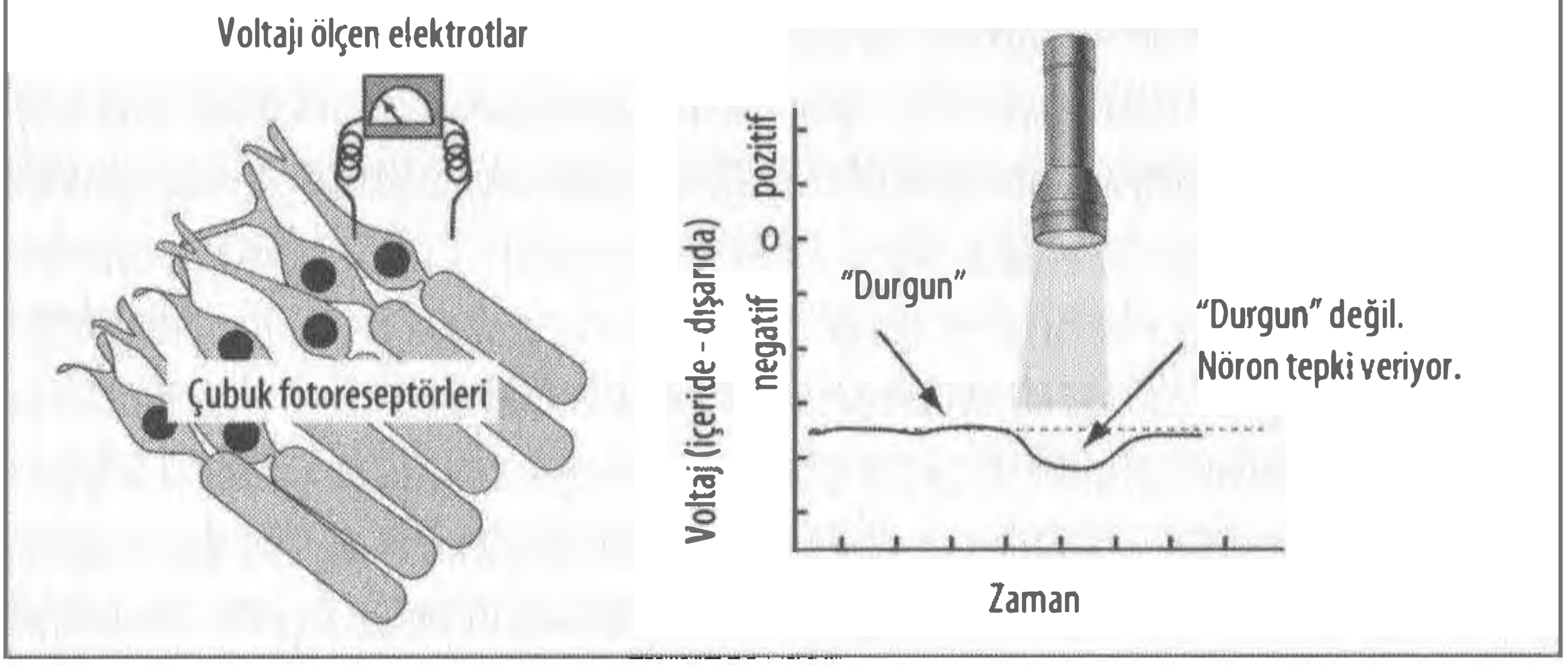
Karanlıkta fotopigmente bağlandığında opsin için de aynı şey geçerlidir. Fotopigment özgün şeklindeyken opsinin aktif bölgesi bloke durumdadır. Işık fotopigment molekülünün şeklini değiştir-

diğinde, opsin molekülüne giden yuvaya artık uymaz. Fotopigmentin yeni, eskisine göre tuhaf şekli, yuvarlak deliğe sokulmaya çalışılan dörtgen bir nesne misali, opsinle bağlantısının bozulmasına neden olur. Fotopigment molekülü ışığı algılama rolünü yerine getirmiştir, opsinin işi ise daha yeni başlamaktadır. Fotopigment molekülünün engellemelerinden artık uzak olan opsin de şeklini değiştirir. Aktif bölgesi artık ulaşılabilir ve uygun olduğu tepkimeyi katalize edecek durumdadır. Opsin bir tepkimeyi katalize eder, o tepkime başka bir protein katalizörünü faaliyete geçirir, o da bir başkasını ve bu durum böyle devam eder. Her aşamada daha fazla molekül işin içine girerek ilk foton alımının etkisini büyütür.*

Bu ilk evreler hâlâ tamamen biyokimyasaldır. Bir molekül değişime uğrar, o da kimyasal bir zincirleme tepkimeyle bir dizi başka moleküle dönüşür. Beyindeki bilgi akışı ise elektrikseldir. Bu kimyasal tepkimeler bir elektrik sinyalini nasıl ortaya çıkarır? Bu süreçteki diğer adımları anlamak için sinir sistemindeki hücrelerin elektriksel işlemleri hakkında birkaç ayrıntıyı bilmek gerekir.

Daha önce belirtildiği üzere, fotoreseptörler bir çeşit nörondur, bilgi işlem birimleri olarak iş gören beyin hücreleridir. Her hücre gibi nöronlar da bir zarla kaplıdır. Ne var ki nöronlarda bu zarlar elektriksel bir sınır da oluşturur (Şekil 2.4). Nöron hücresinin içi dışına kıyasla elektrik yüklüdür, bu da nöronun *durgun zar potansiyeli* olarak bilinen şeye neden olur. Çok düşük, –70 mV (milivolt) gücünde, kol saati pilinin voltajından on kat düşük bir elektrik potansiyelidir bu. Ama bu potansiyel bir mihenk taşıdır. Bir nöronun aktif olduğu veya yanıt verdiği söylendiğinde, bu o nöronun hücre zarın-

* Ayrıntısını merak edenlere: Opsinin katalize ettiği tepkimede başka bir protein, transdusin yer alır. Transdusin normalde GDP (guanozin difosfat) adıyla bilinen bir moleküle bağlıdır. Transdusin, opsinin yardımıyla GDP molekülünü ortadan kaldırarak yerine GTP (guanozin trifosfat) adlı molekülün gelmesini sağlar. Bu değişim transdusinin şekil değiştirip birçok parçaya ayrılmasına neden olur. Transdusinin bu parçalarından biri bir başka proteine, fosfodiesteraza bağlanır. Bu bağlanma fosfodiesterazın şeklinin değişmesine ve bu molekül içindeki bir aktif bölgenin açığa çıkmasına neden olur. Bu yeni aktive olmuş fosfodiesteraz başka bir tepkimeyi, cGMP'nin (siklik guanozin monofosfat adlı dairesel bir molekül) dahil olduğu bir tepkimeyi katalize eder, cGMP de başka bir moleküle (5'-guanozin monofosfat adında, cGMP'nin açık versiyonu olan bir molekül) dönüşür.



Şekil 2.4 Bir nöronun iç voltajı ile dış voltajını karşılaştırdığınızda genellikle iç voltajın dış voltaja oranla negatif (negatif yüklü iyonlara veya daha az pozitif yüklü iyonlara sahip) olduğunu görürsünüz. Hiçbir şey olmadığında, yani duyusal uyaranların olmadığı veya başka nöronlardan sinyal gelmediği zamanlarda nöronun zarı boyunca yaşanan voltaj farkı *durgun zar potansiyeli* olarak adlandırılır. Duyusal olaylar veya başka girdiler bu voltaj farkının değişmesine neden olduğundaysa nöronun yanıt verdiği söylenir. Işık, fotoreseptörlerin durgun zar potansiyelinin azalmasına ve biraz daha negatif olmasına neden olur. Nöronlar ayrıca girdilere, durgun zar potansiyellerinde pozitif değişiklikler yaparak da yanıt verebilirler.

daki elektrik yükünün bu durgun halindeki elektrik yükünden farklı olduğu anlamına gelir. Durgun haldeki elektrik yüklerinin değişmesi nöronların bilgi sinyali vermelerine, sonunda da (ileride göreceğimiz gibi) o bilgiyi beyindeki diğer nöronlara iletmelerine olanak sağlar.

Nöronun içindeki elektriksel ortam zar tarafından yönetilir. Zardaki küçük gözenekler nöronun içine ve dışına doğru gerçekleşen iyon (elektrik yüklü atom veya molekül) akışını kontrol eder. *İyon kanalı* adıyla bilinen bu gözenekler farklı türdeki iyonların zardan geçişine izin verir. Örneğin bazı iyon kanalları sodyum iyonlarının, bazıları potasyum iyonlarının, bazıları da klorür iyonlarının geçişine izin verir. Bu iyonlar elektrik yüklü oldukları için, nöronun içine girerken ve dışına çıkarken nöron zarının voltajını değişikliğe uğratırlar.

İyon kanalları tıpkı bir kapı gibi açılıp kapanabilir. Fotoreseptörlerdeki ilgili iyon kanalı, kapısı bir "haberci" molekül tarafından

yönetilen bir sodyum kanalıdır. Haberci molekül bol miktarda olduğunda, bu iyon kanalı kapılarının büyük bölümü açıktır ve sodyum hücrenin içine dolu dolu akar. Az olduğundaysa kapı kapanır, sodyum akışı durur. Hücre içine doğru pozitif yüklü sodyum akışı fotoreseptörün voltajını pozitif yönde değiştirirken bu akışın engellenmesi diğer iyon kanallarıyla olan dengeyi değiştirir ve nöronun voltajının daha negatif olmasına neden olur.

Bu sodyum kanallarını kontrol eden haberci molekül, fotopigmentlerdeki ışık emilimiyle başlayan biyokimyasal tepkime zincirinin sonunda yer alır. Işık kaynaklı biyokimyasal tepkimelerin sondan bir önceki aşamasında, haberci molekülü aktif olmayan bir biçime dönüştüren bir katalizör aktive olur.* Bu durum haberci sayısını azaltır, bunun sonucunda sodyum kanalları kapanır, sodyum akışı durur ve nöronun voltajı daha negatif bir eğilim gösterir. Işık elektriksel bir tepkiye neden olmuştur!

Bu elektrik sinyaline neden olan biyokimyasal zincir, küçük bir olayın daha büyük bir elektrik sinyaline dönüşmesi için gereklidir ama bunun bir bedeli vardır: Bu süreç zaman alır. Görme duyunuz, fiziksel bir uyaranın elektriksel bir tepkiye dönüşmesinin bu kadar aşamaya ihtiyaç duymadığı işitme, dokunma ve denge duyunuzdan daha yavaş çalışır. Kulak, deri veya kaslarınızın içindeki nöronların sese, dokunuşa veya harekete yanıt vermesi birkaç milisaniye içinde gerçekleşir. Oysa ışığın fotopigment molekülü tarafından emildiği andan elektriksel potansiyelin yüklenmeye başladığı âna kadar onlarca milisaniye geçer. Işıktaki hızlı dalgalanmaları fark edememizin nedeni görme duyusunun bu yavaşlığıdır. Bilgisayarınızın ekranı saniyede yaklaşık 60 ila 70 döngü halinde, başka bir deyişle 14 ila 17 milisaniyede bir titreşir; fotoreseptörlerin yanıt vereceği hızdan biraz daha hızlı yani. Ekranınızın veya video kartınızın daha hızlı çalışması için daha fazla para harcamanıza gerek yok, çünkü gözleriniz bu hıza zaten yetişemez.

Göz, işte ışığı bu şekilde algılar. Ne var ki, ışığı algılamakla üç boyutlu dünyayı görmek için ışıktan yararlanmak aynı şeyler değildir.

* Bu katalizör fotodiesteraz, haberci ise önceki dipnotta belirtilen cGMP'dir.

EVRİMSEL AÇIDAN bakıldığında, bazı hücrelerin ışığı algılama yeteneklerinin eski bir adaptasyon olduğu anlaşılıyor. Bitki ve hayvan dünyasında bu tür hücreler çok fazla ve çeşitlidir. Bitkilerde ışığı algılama büyüme ve fotosentez için temel bir öneme sahiptir ve önceki bölümde tarif edilene benzer bir mekanizmayla gerçekleşir. Hayvanlarda en basit göz, gövde yüzeyinde bulunan ve *pigment benek göz* adı verilen bir fotoreseptör kümesinden oluşur. Denizanası, yassıkurt ve denizyıldızı gibi omurgasızların hepsi bu tür gözlere sahiptir.

Ne var ki bitkilerde ve bu hayvan türlerinde bu "gözler" ışığın konumunu pek iyi algılayamaz. Bunun nedeni, ek bir yardım olmadığında fotoreseptörlerin yalnızca ışığın yoğunluğu ve dalga boyuna karşı hassas olmalarıdır. Elektriksel faaliyetlerini ölçmek için bir fotoreseptörün yanına bir elektrot koyduğunuzda, gözleyeceğiniz değişimler yalnızca o fotoreseptöre doğru dalga boyu aralıklarında ne kadar elektromanyetik radyasyonun ulaştığına bağlıdır. Elektromanyetik radyasyon ne kadar fazla olursa fotoreseptörün elektrik sinyali üzerindeki etkisi o kadar fazladır.

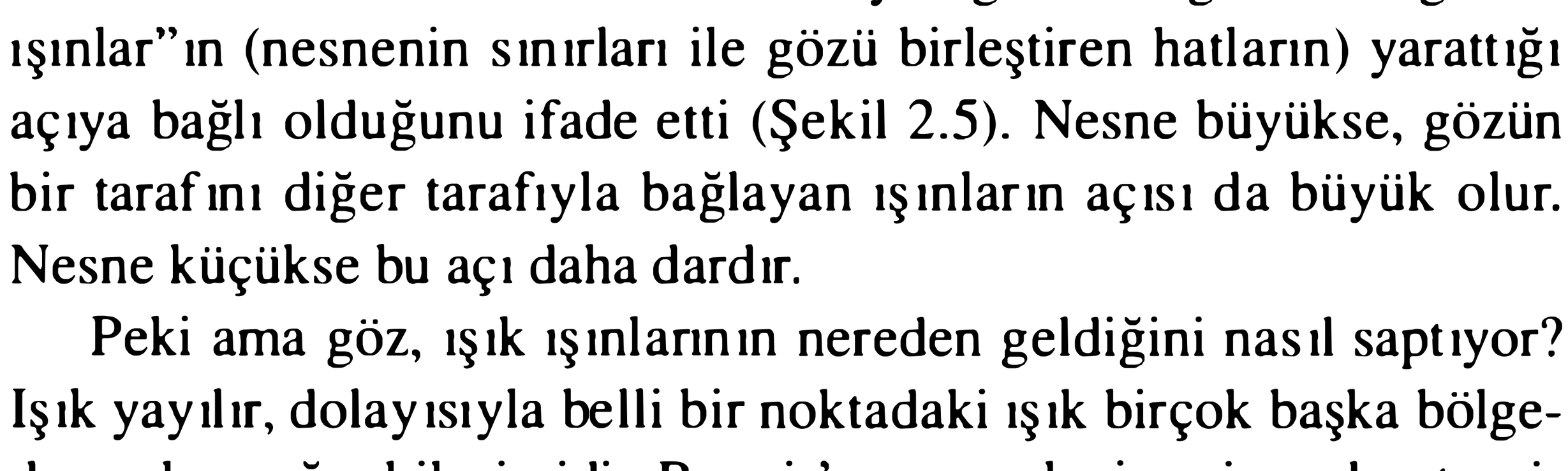
Mekânsal konumu algılamak için göz, fotoreseptöre tam olarak ne kadar ışığın ulaştığını kontrol edebilecek bir mekanizmaya ihtiyaç duyar. Pigment benek göz, ışığı fotoreseptörün yüzeyine doğrultacak yapısal özelliklere sahip değildir, dolayısıyla görmek için bu ilkel gözlere mahkûm olan türlerin görsel-mekânsal yetenekleri genelde aydınlık bölgelere doğru hareket etmek ve karanlık bölgelerden uzaklaşmakla sınırlıdır (ki bunu da ancak gövde yüzeylerinin farklı bölgelerinde çok sayıda benek gözleri olduğu için, bu sayede farklı yönlerdeki ışık seviyelerini karşılaştırabildikleri için yapabilirler).

Omurgalı hayvanlarda ise fotoreseptörler dışarıda değil içeride, göz küresinin arka yüzeyindedir. Gözün şekli ve çeşitli kısımları (özellikle de gözbebeği, mercek ve göz sıvıları) ışığın retinal fotoreseptör tabakasına ulaşıncaya kadar izlediği yolu denetler. Bu yapılar bir arada retinaya ulaşan ışığın mekânsal örüntüsünü denetler; ortamdaki ışık örüntüsünün, mekânsal ilişkileri bozulmamış bir kopyasını üretirler.

Gözün böyle bir imgeyi nasıl oluşturduğunu anlamak yüzyıllar aldı. Süreç yine antik Yunan'da, Öklit'in geometri çalışmalarıyla başlayıp Rönesans Avrupasında doruğa çıkan araştırmalarla devam etti. Tam o sırada gökbilimci Johannes Kepler'in çığır açan keşfi, gözbebeğinin gözün billursu ve sulu unsurlarının güç birliği yaparak ışığı kırıp büktüğünü ve onu görsel dünyanın keskin ve net bir yansımasına dönüştürdüğünü ortaya koydu. Bunun gerçekleşmesinin nedeni ışığın (oldukça) düz bir çizgide yol almasıydı. Işığın doğrusal bir yol izlemesi mekânsal görüşü mümkün kılar ama ışık çizgilerinin nereden geldiğini bilmeniz şartıyla.

Öklit görmenin doğrusal çizgilerle gerçekleştiğini vurgulayan ilk kişiydi. Ama bu o kadar da bariz bir şey değildi o zamanlar. İleride, 5. Bölüm'de de göreceğimiz üzere, düz hatlar halinde duymayız (ses engellerin çevresinden dolanabilir) ve gerek ses gerekse ışık uygun yüzeylerde yansıyabilir. Dolayısıyla, doğrusal çizgi temelli görme kavramı o zamanlar bugünkü gibi apaçık bir kavram değildi. Öklit bir nesnenin nerede ve nasıl büyük görüneceğinin bu "görsel ışınlar"ın (nesnenin sınırları ile gözü birleştiren hatların) yarattığı açıya bağlı olduğunu ifade etti (Şekil 2.5). Nesne büyükse, gözün bir tarafını diğer tarafıyla bağlayan ışınların açısı da büyük olur. Nesne küçükse bu açı daha dardır.

Peki ama göz, ışık ışınlarının nereden geldiğini nasıl saptıyor? Işık yayılır, dolayısıyla belli bir noktadaki ışık birçok başka bölgeden gelen ışığın bileşimidir. Renoir'nın yemek yiyen insanları tasvir



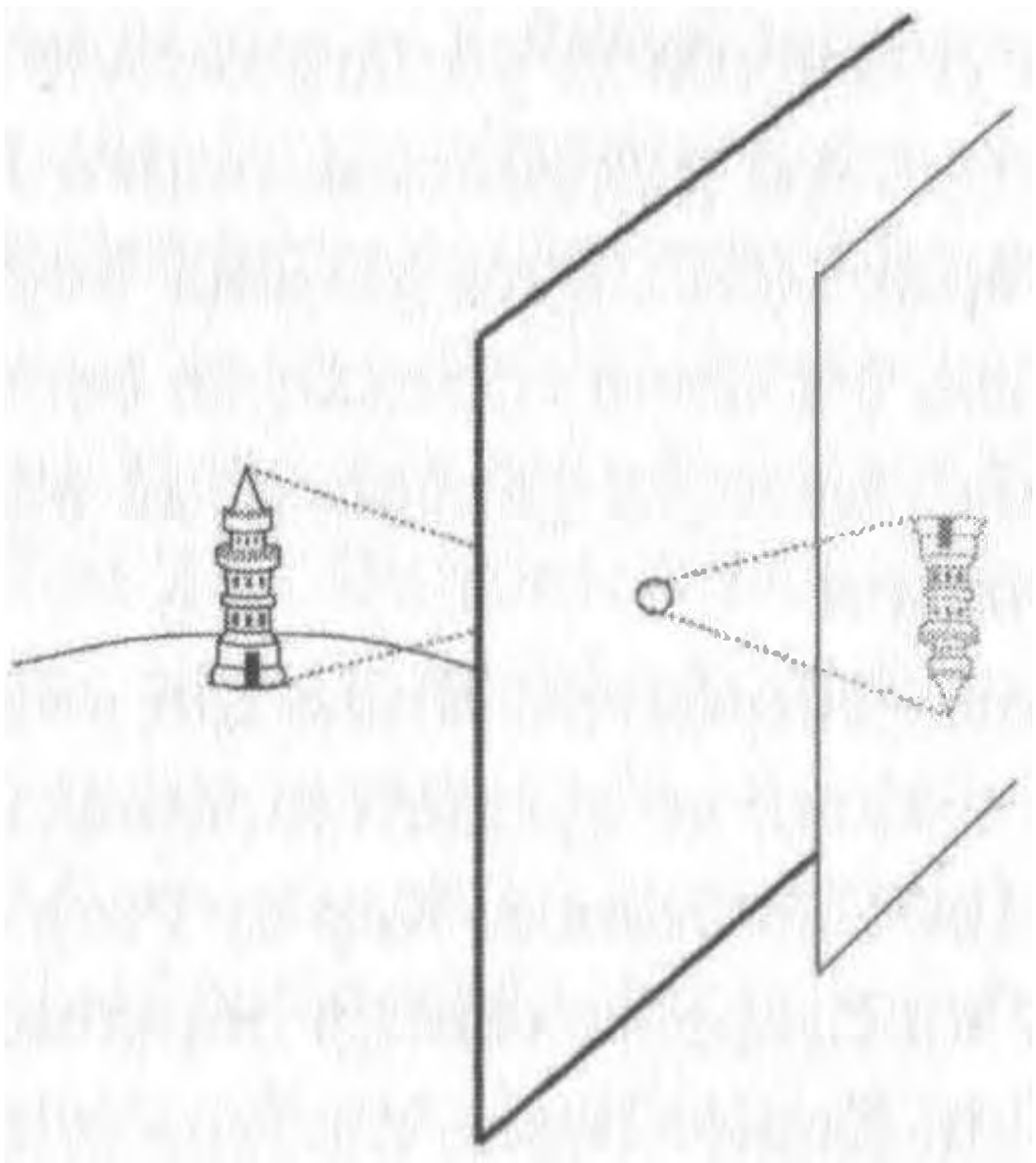
Şekil 2.5 Nesnenin çeşitli bölgelerinden yayılan ışık ışınları göze farklı yönlerden ulaşarak açı oluşturur. Öklit her ne kadar ışığın ne olduğunu (yani ışığın hangi yönde hareket ettiğini) bilmiyorduysa da nesnelerle göz arasındaki geometrik ilişkiyi ortaya koyabilmişti. Büyük nesneler gözde büyük açılar oluştururken küçük nesneler küçük açılar oluşturur.

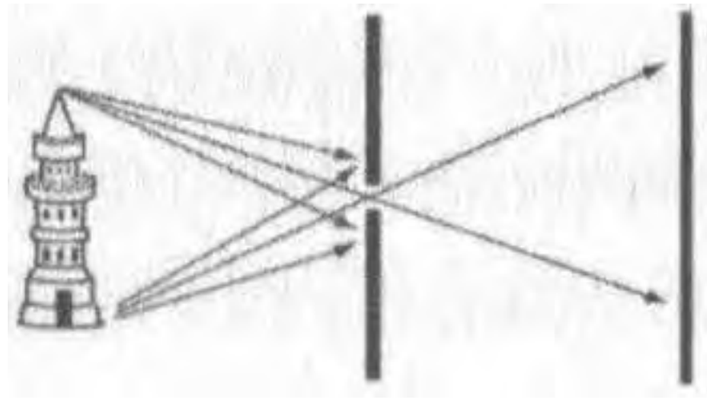
ettiği tablosunu ele alalım örneğin (s. 106, Resim 2). Yansıyan ışık, ortamdaki nesnelerin hepsinin (bardakların, tabakların, şarap şişelerinin veya insanların) yüzeyinden her yöne yayılır. Şimdi bunun belli bir nirengi noktasından bakıldığında ne anlama geldiğini düşünelim. Bu sahnedeki belli bir konuma (örneğin soldaki kadının omzuna) ulaşan ışık ölçülecek olsaydı, sahnedeki bütün o farklı konumlardan gelen ışığın oraya aynı anda ulaştığı görülürdü. Işığın bir kısmı şarap şişesinin tepesinden, bir kısmı bardaktan, bir kısmı meyve tabağından, bir kısmı da bütün diğer bölgelerden herhangi bir engele uğramadan, düz bir hatta o bölgeye yansır. Sonuç bulanıktır. Kadının omzuna baktığınızda, oradaki ışığın bu kaynaklardan geldiğine dair herhangi bir belirti bulamazsınız. Kısacası, ışık her ne kadar doğrusal bir hatta gelse de bu tür birçok hat mevcuttur ve bunlar bir araya gelmiştir. Hiçbir imge oluşmamıştır.

Mekânsal görüş için farklı yerlerden gelen ışık ışınlarını organize edecek bir yol gereklidir. Şarap şişesinden ve meyve tabağından yansıyan ışık ışınları bir dizi ışık sensörüne ulaştığında aralarındaki mekânsal ilişki devam ederse, o zaman bu iki ışık kaynağını ayrı ve belirgin bir şekilde görmek mümkündür. Işığın kaynak konumunun ışık sensörleri üzerindeki konumuyla bire bir uyuşması gerekir.

Işık ışınlarını ayıklamanın yollarından biri, onları çok küçük bir delikten geçirip filtrelemektir. Iğne deliği büyüklüğündeki deliklerin görüntü oluşturma kapasiteleri MÖ beşinci ve dördüncü yüzyıllardan beri biliniyor. *Camera obscura* adıyla bilinen aygıtın antik Yunan'da ve Çin'de birbirinden bağımsız olarak keşfedildiği ve hem Aristoteles hem de Çinli filozof Mozi tarafından tarif edildiği anlaşılıyor. *Camera obscura*, ışığı içeri alan küçük bir aparatı bulunan bir kara kutu veya odadır. Işık bu delikten girer ve karşı duvara yansır, duvarda dış sahnedeki imgenin net bir görüntüsü oluşur (Şekil 2.6).

Delik küçük olduğu için her konumdan gelen yalnızca bir ışık ışını karşı duvara ulaşabilir. Odanın dışındaki sahnede, ışık ışınları her zaman olduğu gibi sahnedeki bütün konumlardan her yöne yansır, ama duvar ışık ışınlarının çoğunun odaya girmesini engeller. Sahnedeki kulenin hem tepesinden hem altından gelen ışığın yolunu izleyelim örneğin. Duvarın dış yüzeyinde, her iki yönden gelen ışık





Şekil 2.6 Bir *camera obscura*. Işık küçük bir delikten geçtiğinde, karşı duvardaki herhangi bir konuma ulaşan ışık ışınları dış sahnedeki yalnızca bir konumdan gelir. Başka konumlardan gelen ışık dış duvar tarafından engellenir. İç duvardaki konumlar ile dış sahnedeki konumlar arasındaki bire bir uyuşma, dış sahnenin bir imgesinin oluştuğu anlamına gelir.

ışınları birbirine karışmıştır. Ama kulenin tepesinden gelen bir ışık ışını aşağı doğru ilerleyerek delikten geçip karşı taraftaki iç duvarın alt kısmına çarpabilir. Kulenin altından gelen bir ışık ışını da yukarı doğru ilerleyerek delikten geçip karşı taraftaki iç duvarın üst kısmına çarpabilir. İçeride ve deliğin karşısında yer alan bu duvarda belli bir noktaya isabet eden ışık, dış sahnedeki tek bir yönden gelmektedir. Bu durum bir imgenin oluşmasını sağlar. (İmgenin baş aşağı ve ters olması meselesine tekrar döneceğiz.)

Göz kısmen bu iğne deliği tekniğinden yararlanır. Hangi ışığın göze gireceğini, gözün ön kısmında yer alan küçük, şeffaf bir delik olan gözbebeği belirler. Işık bu delikten girerek gözün arka kısmında yer alan retinaya ulaşır. Bazı basit canlılarda bu kadarı yeterlidir; bu dar geçit sahnedeki belli bir konumdan gelmeyen ışığın içeri girmesini ve retinanın arkasındaki belli bir noktaya ulaşmasını önler. Ama bu yöntemde bir sorun vardır. Aralık çok küçükse, içeri girmesine izin verilen ışığın gücü düşük, imge de son derece keskin olmasına rağmen soluktur. Delik daha büyük olduğunda ise içeriye daha fazla ışığın girmesine izin verilir ve imge parlak ama bulanıktır.

Bu olayın nedeniyle ilgili açıklama alakasız gibi görünen bir kaynaktan geliyor: bugün daha çok gezegenlerin yörüngeleriyle ilgili bulgularıyla tanınan on yedinci yüzyıl gökbilimcilerinden Johannes Kepler'den. Kepler'in başyapıtı *Optik*, ayın görünür boyutuyla ilgili uyuşmazlıklar konusundaki bir sorunu çözmüş ve berrak ve net bir imgenin oluşturulmasında merceğin gözbebeğiyle nasıl uyum içinde çalıştığını ortaya koymuştur.[3]

Kepler, Tycho Brahe'nin koruması altındaydı. Brahe'nin yıldız ve gezegenlerin konumlarıyla ilgili dikkatli ve ayrıntılı ölçümlerinde ona asistanlık yapmıştı. Brahe 1601'de ölünce, Kepler Prag'da Kutsal Roma İmparatoru II. Rudolf'un Brahe'ye verdiği imparatorluk matematikçisi konumuna getirildi. Kepler Brahe'nin işini miras almakla kalmamış, onun bilimsel verilerini ve bu verileri yayımlama hakkını da elde etmişti. Mars'ın yörüngesel hareketinin ölçümlerini analiz etmeye başlamış, kısa bir süre sonra da Mars'ın güneş etrafında gerçekleştirdiği hareketin yuvarlak değil eliptik olduğu sonucuna varmıştı.

O zamanlar da bugünkü gibi, kemikleşmiş düşünceye karşı durmak hiç de kolay bir iş değildi. Kepler de gezegenlerin güneşin etrafında dairesel bir yörüngede hareket ettiklerini ileri süren geleneksel görüşü çürütmenin düşündüğünden de uzun süreceğini anlamıştı. Böylece akademik işini korumak için birkaç yıl önce başladığı optik konusundaki projesine geri döndü. Kepler'in optik konusuna olan ilgisi doğal olarak gökbiliminden kaynaklanıyordu: Işığın nasıl yol aldığı bilgisi, gezegenler ile yıldızların konumlarını, büyüklüklerini ve hareketlerini ölçmede temel öneme sahiptir. Patronu imparatora bu odak değişikliğini gerekçelendirmek için şunları yazmıştı: "Görme duyusu bir hata yaparsa, bu yalnızca tutulma teorisinin tamamını etkilemekle kalmaz, en önemlisi ... gökcisimlerinin ölçümlerini etkiler."[4] Her iyi bilimci kullandığı araçların nasıl işlediğini ve onlara ne derece güvenebileceğini bilmek ihtiyacını duyar. O dönemin gökbilimcilerinin kullandığı araç kendi gözleriydi ve Kepler gözle görülene inanmanın ne kadar doğru olduğunu bilmek gerektiğini ileri sürmekteydi.

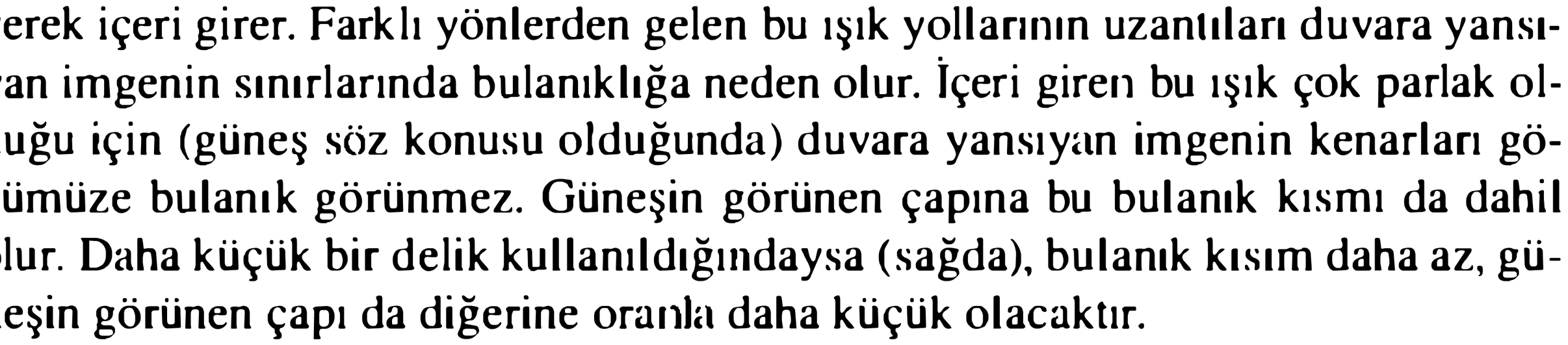
Kepler'in açıklamaya çalıştığı konu bilhassa ayın büyüklüğüyle ilgili ölçümlerdeki gizemli uyuşmazlıktı, zira dolunay zamanında

yapılan tahmini ölçümlerle güneş tutulması sırasında yapılan tahmini ölçümler birbirini tutmuyordu. Kepler, Brahe ve diğer gökbilimciler bu tür ölçümler için *camera obscura* kullanıyordu. Ayın görüntüsü karşı duvara yansıtılıyordu. Bu şekilde ayın çapı ölçülebiliyor ve ayın görüntüsü, *camera obscura*'nın deliği ile karşı duvar arasındaki uzaklık temelinde açı birimlerine dönüştürülüyordu (Şekil 2.7 ve 2.8). Bu yöntemde, ayın güneş tutulması sırasında ölçülen çapının başka zamanlarda ölçülen çapından *daha küçük* çıkması gibi bir sorun yaşanıyordu.

Bu sorun parlak nesnelerdeki bulanıklık etkisi ile ışıksız nesnelerdeki bulanıklık etkisi arasındaki farklardan doğar. İğne delikli bir *camera obscura*'nın karşı ekranına yansıtılmış çok parlak ama ho-



Şekil 2.7 Bir delikten geçerken imgeler biraz bulanıktır. Bulanıklığın miktarı deliğin büyüklüğüyle doğru orantılıdır. Soldaki çizimde, güneşin alt kısmından gelen ışık, deliğin alt köşesini sıyıran yollar ile deliğin üst köşesini sıyıran yolları izleyerek içeri girer. Farklı yönlerden gelen bu ışık yollarının uzantıları duvara yansıyan imgenin sınırlarında bulanıklığa neden olur. İçeri giren bu ışık çok parlak olduğu için (güneş söz konusu olduğunda) duvara yansıyan imgenin kenarları gözümüze bulanık görünmez. Güneşin görünen çapına bu bulanık kısmı da dahil olur. Daha küçük bir delik kullanıldığındaysa (sağda), bulanık kısım daha az, güneşin görünen çapı da diğerine oranla daha küçük olacaktır.



Şekil 2.8 İğne delikli kamera yardımıyla ayın çapını ölçerken, ayın çapı deliğin çapına bağlı olarak biraz daha büyük olacaktır. Güneş tutulması sırasında ise aydan hiçbir ışık yansımaz, yalnızca gölgesi yansır. Güneş ışınları ayın oluşturduğu gölgenin kenarlarından içeri doğru sızdığı için ay dolunay halinde göründüğünden daha küçükmüş gibi görünür.

mojen bir nesnenin imgesine baktığınızda, deliğin çapı imgenin olduğundan büyük görünmesini sağlar; nesnenin kenarlarını bulanık görüntünün dış kenarlarıyla birlikte değerlendirirsiniz (Şekil 2.7).[5] Brahe bu durumdan haberdardı ve güneş ve ayın büyüklüğüyle ilgili ölçümlerinde iğne deliği çapıyla ilgili düzeltmeler yapınıştı. Ne var ki, güneş tutulması sırasında güneş ve ayı inceleyip ölçüm yaptığında kafa karıştırıcı bir şey olmuştu (Şekil 2.8). Güneş tutulmasının ayın güneş ile dünya arasına girmesiyle oluştuğunu hatırlayalım. Ayın arkasında güneşin dış halkasını görebilirsiniz; bu haliyle ay güneşin önünde kara bir yuvarlak olarak görünür. Brahe iğne delikli kameradan baktığında güneş her zamanki gibi daha büyük görünmekle beraber ay *çok küçük* görünmüştü.

Bugün biliyoruz ki hem güneşin hem de ayın imgesinde bulanıklık oluşur, ama ay tutulma sırasında karanlık olduğu için güneşin bulanık kısmı ayın çeperinden içeri sızarak onun daha küçük görünmesine neden olur. Ne var ki o dönemin gökbilimcileri bunu bilmiyordu. Güneşe uyguladıkları matematiksel düzeltmeleri aya da uyguluyor, böylece ayın büyüklüğünü gerçek halinden daha küçük olarak tahmin ediyorlardı.

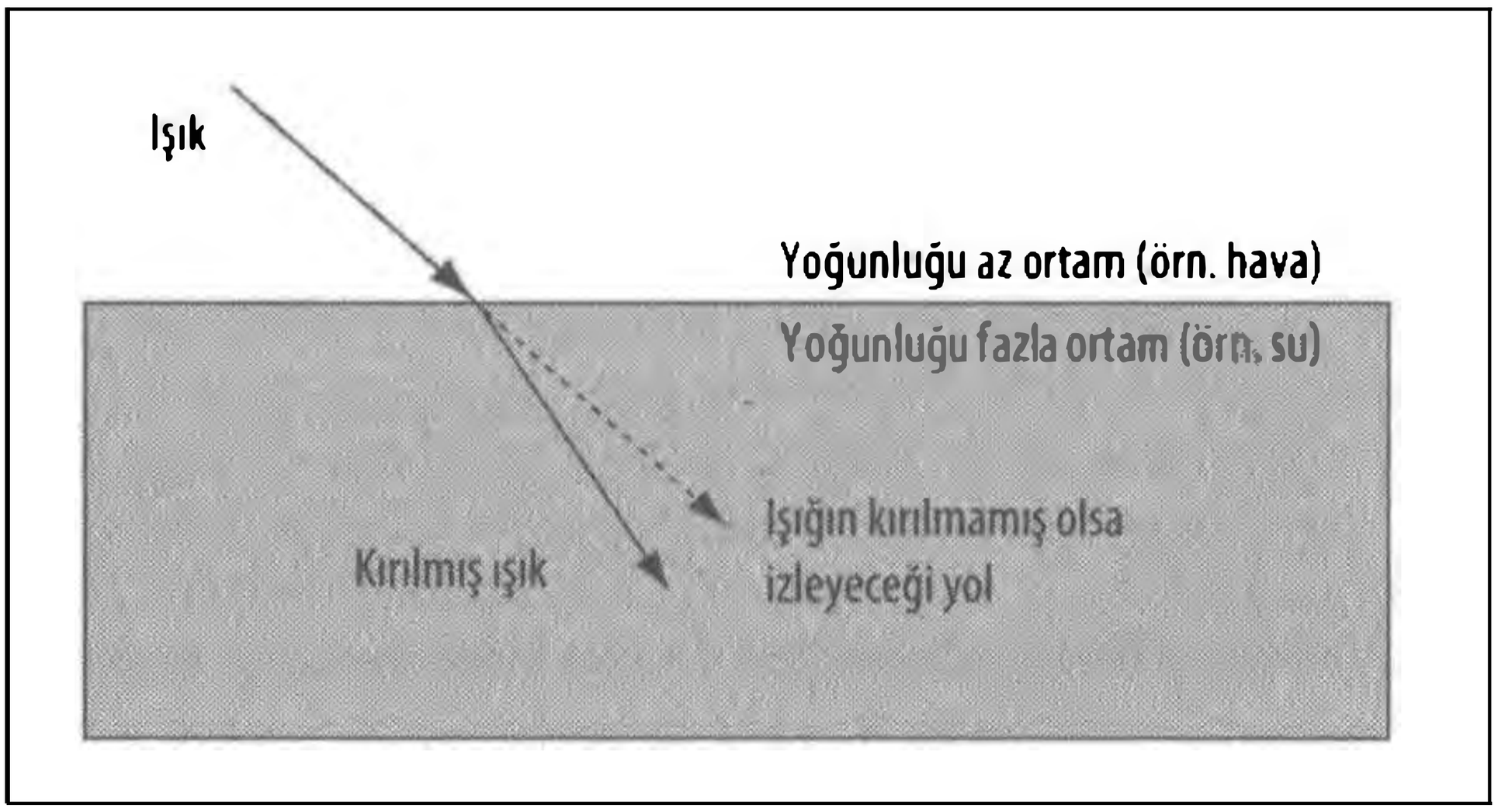
Kepler, iğne deliğinin neden olduğu bu bulanıklık gizemini elinin altındaki basit aletlerle, bir makara iplik ve bir kitapla çözmüştü. Güneşi veya ayı temsil eden kitabı yüksek bir yere yerleştirmiş, kitapla zemin arasına ise ortasında küçük bir deliği olan bir bariyer koymuştu. Sonra kitabın her köşesine ışık ışınlarını temsil eden birer iplik iliştirmiş, bunları delikten geçirmiş ve gerildiğinde iplerin zemine değdiği noktaları tebeşirle işaretlemişti. Tebeşirle belirlenen yerler kitabın dış hatlarının izini oluşturmaktaydı (daha önce ifade ettiğimiz gibi, baş aşağı ve ters şekilde). Işığın delikten nasıl geçtiğini ve imge oluşturduğunu gösteren ikna edici bir modeldi bu. Kepler'in hassas geometrik çizimleri, delik büyüklüğü ile ekrana olan uzaklığın imgenin büyüklüğünü ve bulanıklığı etkileyişinin nedenleri üzerine ayrıntılı bir inceleme yapmasını sağlamıştı.

Kepler ve o dönemin diğer bilimcileri insan gözbebeğinin yeterli miktarda bulanıklık yaratacak büyüklükte olduğunun farkındaydı. 2,5 mm çapındaki bir gözbebeği, onun yaklaşık 25 mm uzağında olan retina yüzeyinde yaklaşık altı derecelik bir bulanıklığa neden

olur. Bu da gözün 50 cm uzağında bulunan görsel uyaranın konumuyla ilgili yaklaşık 5 cm'lik bir belirsizliğe tekabül eder. Böyle bir bulanıklıkla gazetedeki bir sütunu diğerinden ayırt edememiz gerekirdi. Oysa bundan çok daha net görürüz. Aslında, gazete sütunlarından üç yüz kez daha küçük olan görsel uyaranların konum değişikliklerini bile fark edebilecek durumdayız. Bu nedenle Kepler, gözde gerçekleşen imge oluşumunda gözbebeğinin iğne deliği işlevinin ötesinde şeyler olması gerektiğini fark etmişti.

Muammayı oluşturan parçalardan biri de ışığın bükülmesi ya da kırılmayla ilgiliydi (Şekil 2.9). Sabit bir yoğunluğa sahip bir ortamda ışık düz bir hat üzerinde yol alır. Işık havadan çıkıp daha yoğun (veya daha az yoğun) bir maddenin içine girdiğinde kırılır. (Belinize gelen bir suda aşağı baktığınızda bacaklarınızı çarpık görmenizin nedeni budur. Bacaklarınız eskisi gibidir ama onlardan gözünüze gelen ışık düz bir hatta ilerlemez. Işık ışınları sudan çıkıp havanın içine girerken kırılır. Beyniniz ışığın düz ilerlemediğini anlayamaz ve bacaklarınızın çarpık olması gerektiği sonucuna varır.)

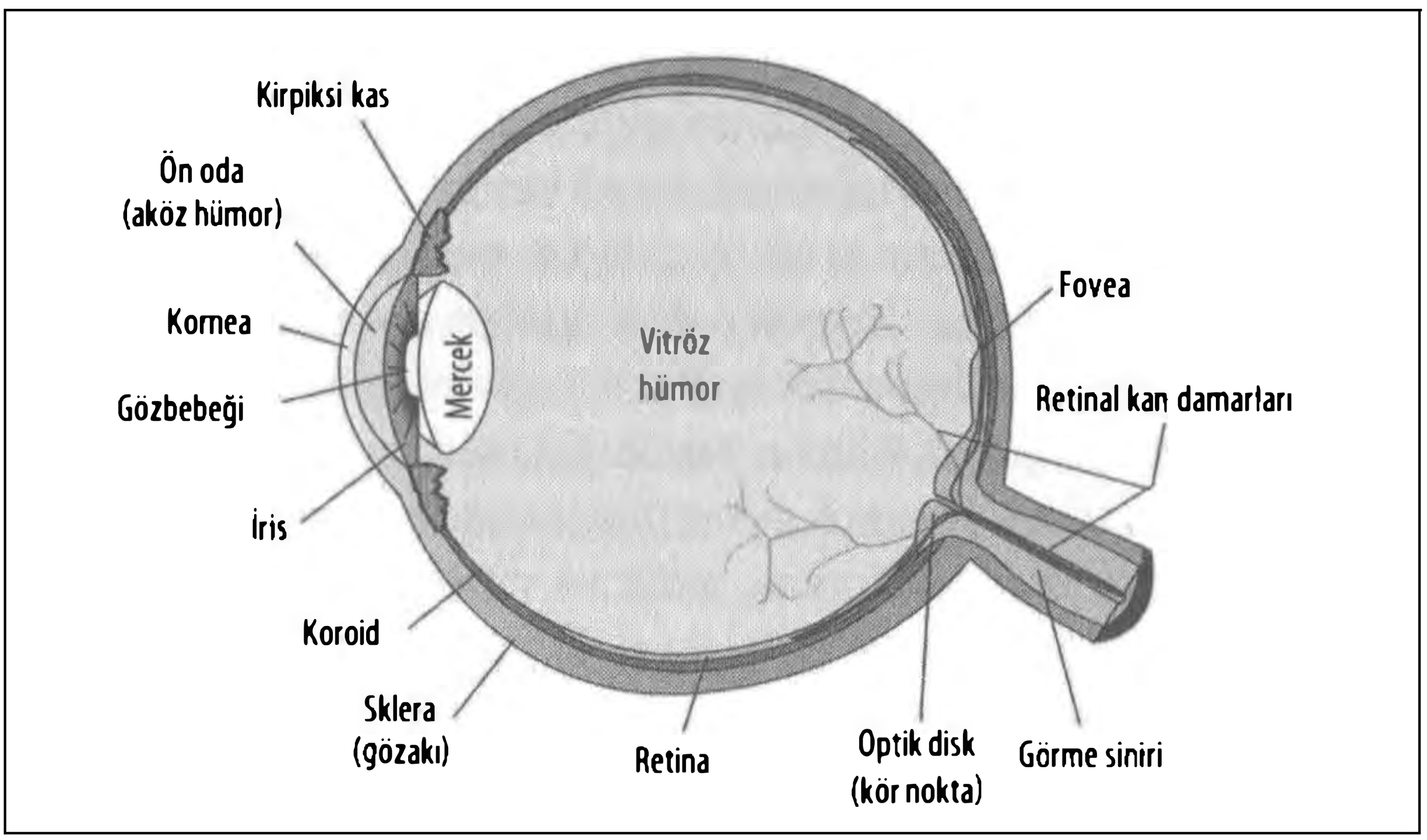
Gözde havanın yoğunluğundan farklı olan ve ışığın kırılmasına yol açan birçok madde (kornea, aköz ve vitröz hümor ve mercek)



Şekil 2.9 Işık, hava ve su gibi farklı yoğunluklara sahip maddeler arasından geçerken kırılır. Kırılmanın ne kadar keskin olacağı ışığın izlediği yola bağlıdır; yani ışığın, yoğunluğu farklı olan yüzeye dik ve yatay bir açıyla düşmesi durumları haricinde, bu iki açı arasındaki hangi açıları izlediği önemlidir. Görme konusunu araştıran ilk araştırmacılar, gözün girişindeki hava-sıvı sınırına dik gelen ışınları gördüğümüzü varsaymışlardır.

bulunur (Şekil 2.10). Kornea ile göz merceği arasındaki bölge sıvı doludur (aköz hümor). Merceğin arkasında, göz küresini basket topu gibi şişiren jölemsi bir madde olan vitröz hümor yer alır. Işık bu maddelerin her birinden geçerken kırılır.

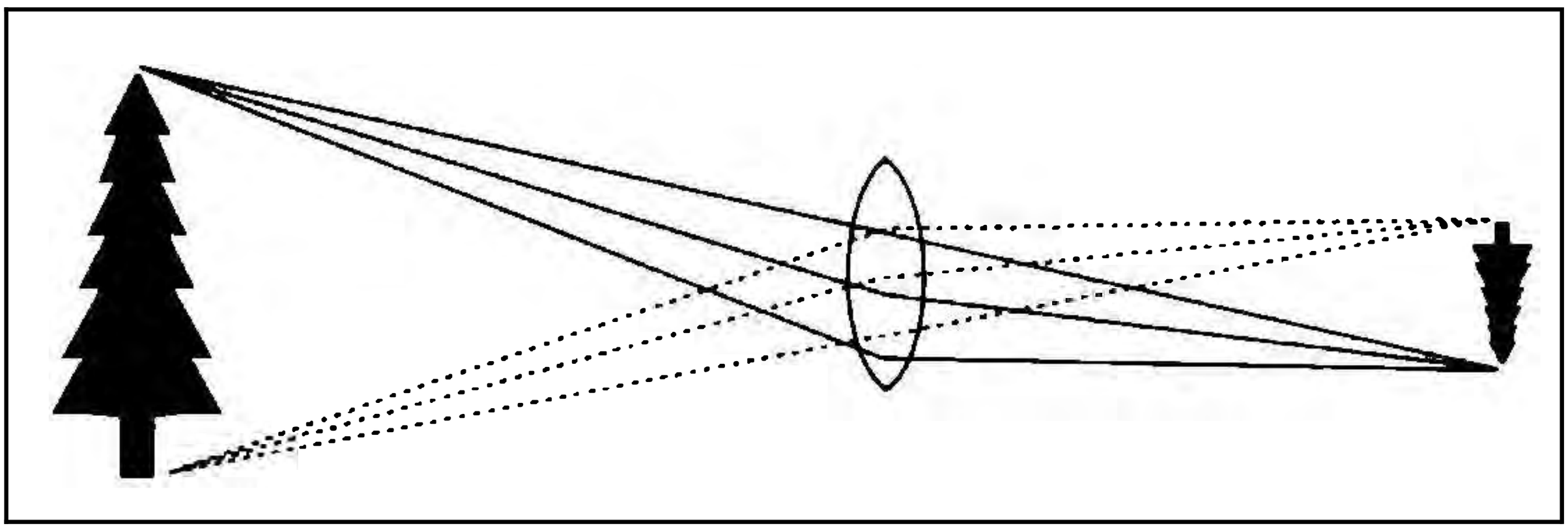
Âlimler ışığın gözün içine girdikten sonraki kırılış biçiminin gözbebeği kaynaklı bulanıklık sorununu bir şekilde çözüyor olabileceğini düşünmüşlerdi, ama Kepler'den önce hepsi yanlış yolda ilerlemişti. Çoğu âlim gözün bir şekilde sadece kırılmaya uğramamış ışı-



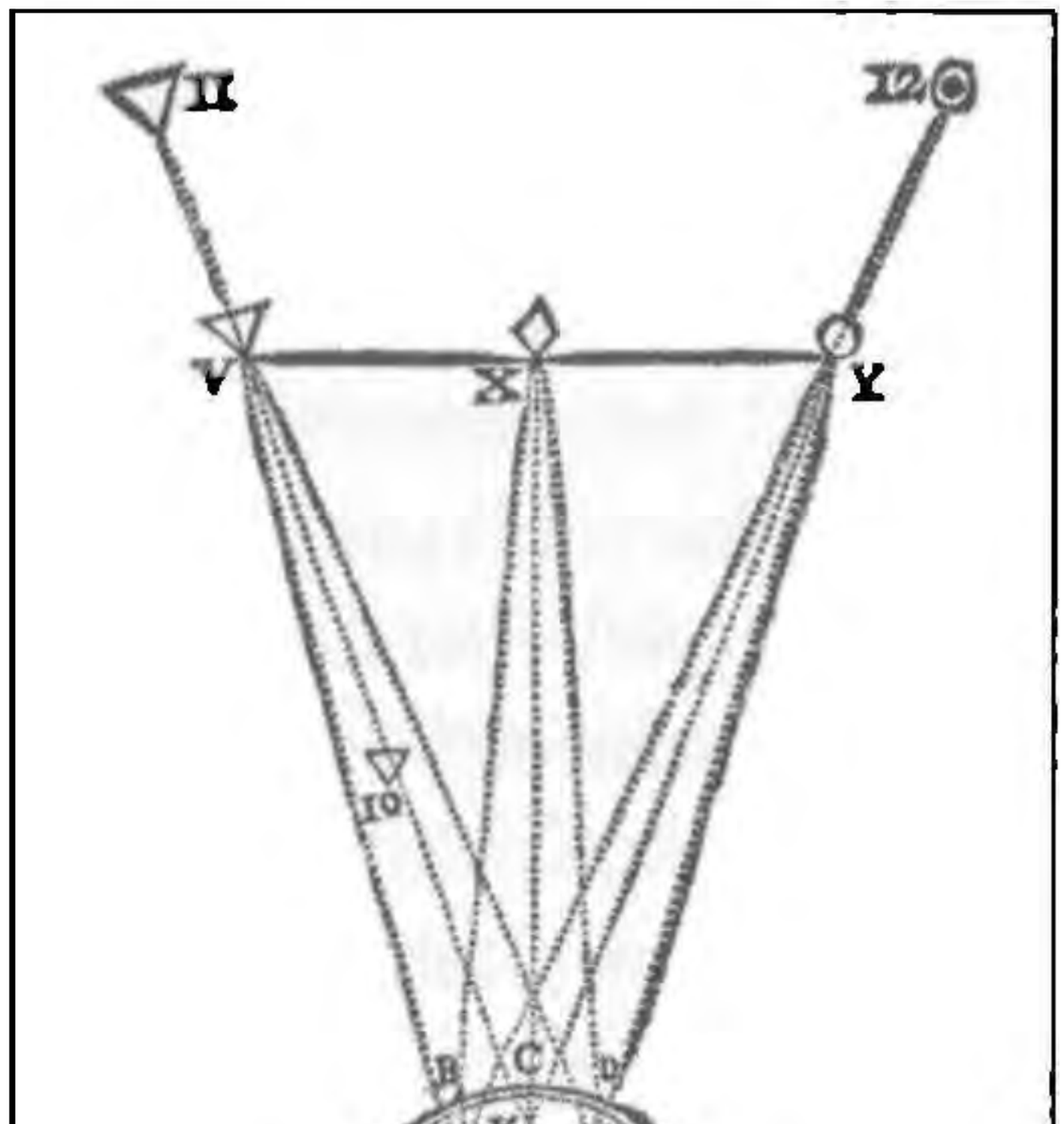
Şekil 2.10 İnsan gözünün anatomisi. Gözbebeği, gözünüze rengini veren iriste yer alan açıklıktır. Gözbebeği iğne deliği kamerasındaki delik gibi işlev görür. Kornea, mercek, aköz ve vitröz hümorların hepsi berraktır ama havadan daha yoğundur, ışığın kırılmasına neden olurlar. Kornea ve hümorlar aslında ışığın kırılmasında mercekten daha fazla rol oynarlar; bu yapılar kümülatif mercek kompleksinin bir parçası olarak kabul edilebilir. Göz merceğinin kendisinin genelde görmede kilit öneme sahip olduğu düşünülür, bunun temel nedeniyse merceğin ayarlanabilir tek kırılma unsuru olmasıdır. Göz merceğinin şekli gözün içindeki küçük kirpiksi kaslar tarafından belirlenir. Bu kaslar merceği yassıltarak veya şişirerek merceğin odak uzunluğunu değiştirir ve bir imgeyi gözün arkasındaki retinanın fotoreseptörleri üzerine odaklarlar. Merceğin ve gözbebeğinin tam karşısında, retina üzerinde, *fovea* adıyla bilinen, fotoreseptörlerin yoğun biçimde bir arada olduğu bir alan yer alır. Sinyaller retinadan beyne görme siniri yoluyla gönderilir. (Fovea ile görme siniri konusuna 4. Bölüm'de tekrar geleceğiz.) Bütün bu yapılar sert bir dış örtüyle (sklera) kaplanmıştır, bu örtünün üzerinde ise kan damarlarıyla kaplı bir tabaka (koroid) bulunur.

ğı gördüğünü ileri sürmüştü, çünkü kırılmaya uğramamış ışık kırılmış ışıktan daha parlaktı. Kepler ise bunun etkisinin az olduğunu fark etmiş, alternatif bir açıklamanın peşine düşmüştü.

Kepler, sahnedeki bir noktadan çıkıp farklı açılardan göze ulaşan ışığın, gözün eğri yüzeyinin arkasında, o noktayla ortak bir konuma odaklanacak şekilde kırıldığını ileri sürdü. Bu fikir genel hatlarıyla Şekil 2.11 ve 2.12'de tasvir edilmektedir.[6] Aynı kaynaktan gelen çe-



Şekil 2.11 Bir ışık mercekten geçerken, geliş açısına bağlı olarak farklı şekillerde kırılır. Merceğe dik düştüğünde düz ilerler (en alttaki kesik çizgi veya en üstteki düz çizgi). Daha keskin açılarda daha fazla kırılır. Merceğin arkasında, *odak uzaklığı* adıyla bilinen noktada, dünyada belli bir konum oluşturan bütün hatlar ortak bir konumda birleşir. Yukarıdaki çizimde, ağacın alt kısmından gelen ışığın yollarını temsil eden kesik çizgiler bir noktada tekrar birleşir, ağacın üst kısmından gelen düz çizgiler de öyle. Bu şekilde, baş aşağı ve ters bir imge oluşur.



Şekil 2.12 René Descartes, Kepler'in *Optik* başlıklı eserinden otuz küsur yıl sonra yazdığı kitabında Kepler'in kavramını tasvir eden bu şekli çizmiştir.

şitli ışınlar merceğe farklı açılardan ulaşır ve (tıpkı sihir gibi!) tam da doğru miktarda kırılarak ortak bir noktada buluşurlar.

Yani Kepler'in bu konudaki temel görüşü, gözün yoğun maddelerinin neden olduğu kırılmanın ve gözbebeğinin iğne deliği işlevinin bir arada gözün arka kısmında bir imgenin oluşmasını sağladığı biçimindeydi. Kırılma efekti gözbebeğinin epeyce büyük açıklığının yarattığı bulanıklığı en aza indirmekteydi.

O dönemlerde bununla ilgili bir kanıt mümkün değildi ama bugün Kepler'in varsayımının öz itibariyle doğru olduğunu biliyoruz. Yirminci yüzyılda sinirbilimciler, optiğin nöronların görsel imgelere verdikleri tepkiler ve onları temsil etme biçimleri üzerindeki etkilerini kanıtladılar. Retinadaki bir fotoreseptörün içine veya çok yakınına bir elektrot yerleştirirseniz, fotoreseptörün ışığa verdiği elektriksel tepkiyi ölçebilirsiniz. Koyu bir zeminde parlak bir nokta gibi basit bir görsel uyaran sunduğunuzda, fotoreseptörün faaliyetinde bir değişiklik gözlemlenir ama parlak noktanın doğru konumda olması şartıyla. Parlak noktayı azıcık bile oynatsanız fotoreseptör bu noktaya karşı "körleşecek"tir. Bu nokta tüm parlaklığıyla gözbebeğinden geçer, kornea, mercek ve gözün sıvıları tarafından kırılmaya uğratılır ve ışınları retina yüzeyinde belli bir noktaya ulaşır. Tam o bölgedeki fotoreseptörler tepki verir. Yakındaki fotoreseptörlerde herhangi bir tepki oluşmaz. Parlak noktanın yerinin değiştirilmesi onu "görecek" olan fotoreseptörlerin değişmesine neden olur, yeni fotoreseptörler tepki vermeye başlarken eskiler tepkisizleşir.

Fotoreseptörlerin gözbebeği ve gözün ışığı kırma özelliği sayesinde edindikleri mekânsal seçiciliğe *alıcı alan* adı verilir. Işık ancak dış ortamdaki alıcı alandan geldiğinde bir fotoreseptörün faaliyetini etkileyebilir. Nöral aktivitenin mekânsal düzeni, görsel alandaki ışık örüntüsünü (baş aşağı ve ters olarak) yansıtan retinayı aydınlatan ışığın örüntüsünün mekânsal düzenini bu şekilde taklit eder.

Bir sorun daha var ama. O dönemin araştırmacıları imgenin bu baş aşağı ve ters örüntüsünü zarafetsiz buluyordu. Kepler çizdiği şekilleri "acımasız" sağlamalardan geçirmiş ama sonunda etrafından dolaşılacak hiçbir şey bulamamıştı. Leonardo da Vinci bu durumu son derece mantıksız bulmuş, göz merceğinin rolünün imgeyi tekrar doğru yöne çevirmek olduğu sonucuna varmıştı. Daha sonra Des-

cartes imgenin gerçekten de ters döndüğünü gösteren kanıtı ortaya koydu. Bir ineğin gözünü teşrih eden Descartes, gözün arka kısmını içinden bakılacak kadar şeffaflaşana dek kazıdı. Göz pencere denizliğine yerleştirildiğinde, arka kısmından dışarıdaki manzarayı ters olarak görmenin mümkün olduğunu ileri sürdü.

Ters imgenin gerçek olduğuna ikna olduktan sonra biliminsanları bir süre daha bunun neden ve sonuçları üzerine kafa yormaya devam ettiler. 1896'da, Almanya'nın Leipzig kentinde lisansüstü öğrenimini sürdüren George Stratton adlı Amerikalı bir öğrenci, imge gözün içine baş aşağı değil de düz olarak düştüğünde nasıl bir durum ortaya çıkacağını merak etti. Görsel sahneyi ters çevirecek bir gözlük yaptı, bu gözlükten baktığında retina dünyayı düz "görecek" ti. Stratton, sabah mumu yakmadan önce takıp yatağa yatmadan önce çıkarmak suretiyle gözlüğü günlerce taktı. Hatta deney süresince tersine dönmüş sahneler dışında bir şey görmemek için, gözlüksüz olduğu zamanlarda gözlerini bağlamıştı.

İlk zamanlar çok fazla tökezlemiş ve el yordamıyla hareket etmiş olan Stratton şöyle yazar: "Gözle doğrudan ilgili hareketlerin hemen hepsi çok zahmetli ve yorucuydu... Masada yemek yerken yaptığım en basit hareketleri bile dikkatle yapmak zorunda kaldım. Bir yerden bir şeyi almaya çalışırken hep yanlış elimi kullanıyordum."[7] Zamanla Stratton bu duruma alışmaya başlamıştı: Dolaşabiliyor, yemek yiyebiliyor ve hayatın olağan işlerini yapabiliyordu. Ufak tefek kazalar da oluyordu: Şömineden dışarı yuvarlanan bir kütüğü fark etmemiş ve telaşa kapılmamıştı örneğin.[8] Ama sonuçta, gözlükler gözündeyken dünya hiçbir zaman düz görünmese de bu görsel deneyime uyum sağlamıştı.

Stratton'ın da keşfettiği gibi, görme yalnızca retinaya nasıl bir ışık ulaştığıyla ilgili bir konu değildir. Beynin o imgeyi nasıl yorumladığıdır asıl önemli olan. Beynimiz retinadaki imgenin ters olmasını bekler ve görsel algı sürecinde o imgeyi bir anlamda otomatik olarak yeniden ters çevirir. Retinada ters çevrilmemiş bir imgeyle karşılaşması halinde beynin buna uyum sağlama yeteneği sınırlıdır.

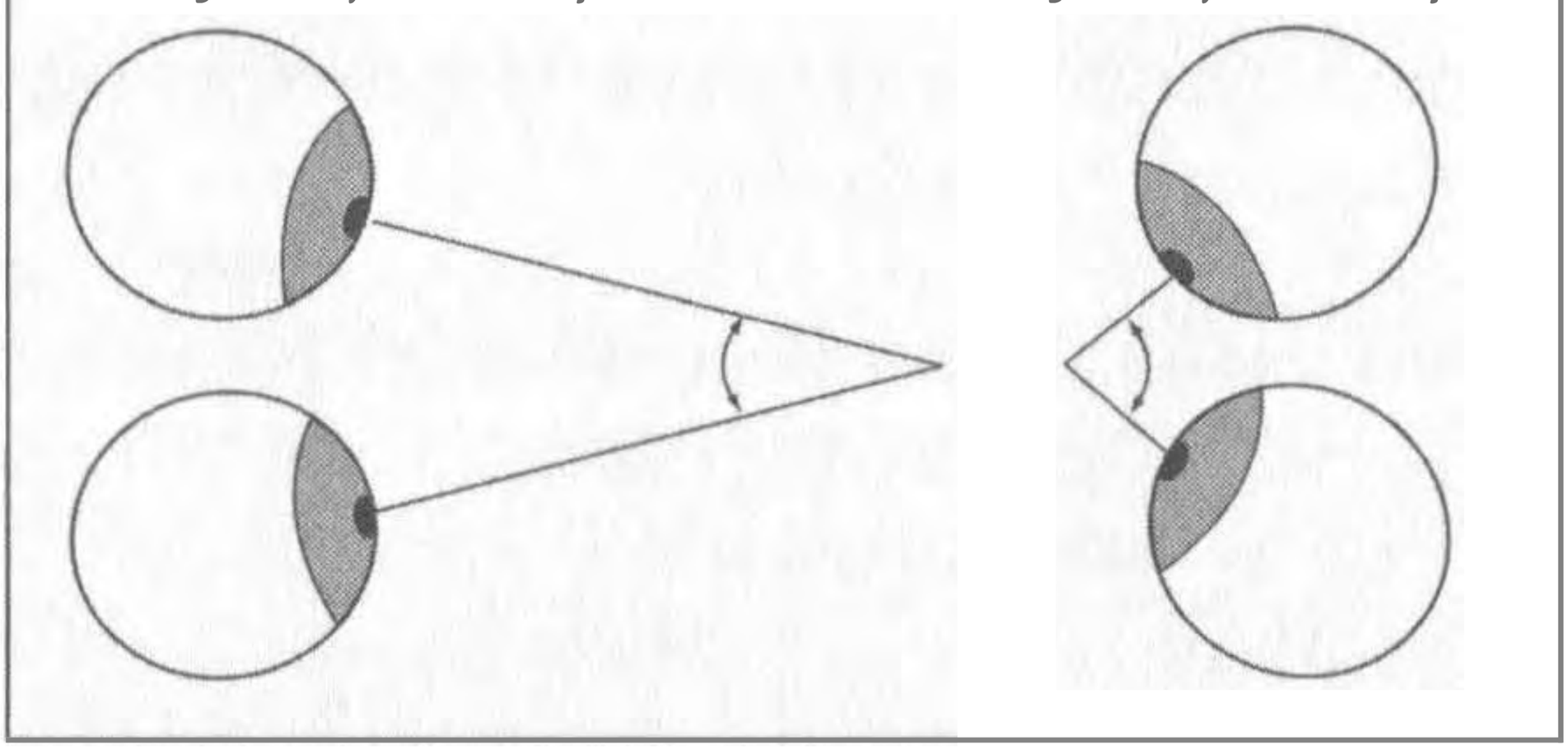
BEYİN tercüman rolünü oynamakta mahirdir. Görmenin pek çok veçhesi tercümeden yararlanır ama belki de hiçbiri görmenin mesafe veçhesi kadar önemli değildir. Retinadaki imge üç boyutlu dünyanın iki boyutlu bir yansımasıdır. Beynimiz bu iki boyutlu imgelerden üç boyutlu dünyayı çıkarsamak zorundadır. Beyin bu çıkarımı yaparken birçok ipucunu bir araya getirir.

İki göze sahip olmak üç boyutu algılamanın önemli unsurlarından biridir. Gözlerimiz aralarında birkaç santimlik mesafe olacak şekilde dengelenmiştir, dolayısıyla her biri sahneyi diğerinden biraz farklı bir açıdan görür. Çoğu nesnenin imgesinin iki gözün retinalarında birbirinden biraz farklı yerlere ulaşacağı anlamına gelir bu. Beyin, aynı nesnenin iki retinadaki imgelerinin konumlarını karşılaştırarak nesnenin üç boyutlu mekândaki konumu hakkında çıkarımlarda bulunur.

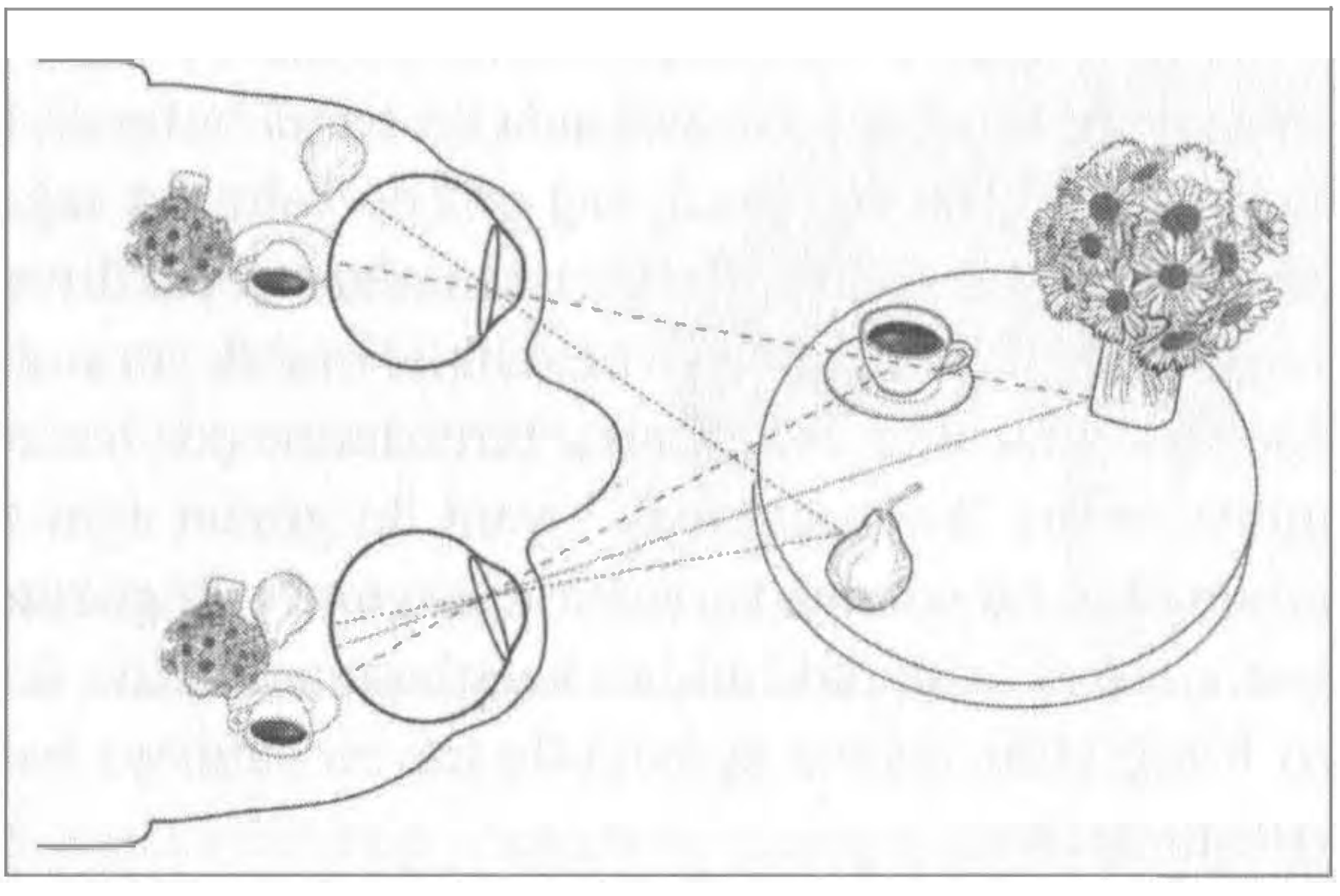
İki imgenin tam olarak nereye ulaşacağı, nesnenin uzaklığına ve gözlerin baktıkları yöne bağlıdır. İki gözünüz tam olarak aynı yöne bakmak zorunda değildir. Gözleriniz arasındaki açı ayarlanabilir. Üç metre kadar uzağınızdaki bir nesneye doğrudan baktığınızda, birbirinden yaklaşık 6 cm uzakta olan gözleriniz birbirine bir derece kadar yaklaşarak nesneyi her iki retinanın merkezine konumlandırabilir (Şekil 2.13). O nesnenin imgesi her iki gözün retinasının merkezindeki aynı bölgeye ulaşır. Gözlerin tam önünde olmayan ama yaklaşık aynı mesafede bulunan diğer nesneler ise, bulundukları yere bağlı olarak imgelerini biraz farklı konumlara yansıtırlar. Bu imgeler de eşleşecektir. Bir başka deyişle, retinadaki imgeler her iki gözde aynı konumda olacaktır. Ama uzaktaki, iki gözün yakınsama (*convergence*) mesafesinin yakınındaki veya uzağındaki diğer nesnelerin hepsi iki gözde eşleşmeyen imgeler yansıtacaktır.

Şekil 2.14'teki sahneyi ele alalım. Gözlerinizin kahve fincanına baktığını ve fincan iki gözün merkezinde yer alacak şekilde birbirine hafifçe yaklaştığını düşünelim. Fincanın imgesi retinanın ortasına düşer. Armut kahve fincanıyla aynı mesafede, biraz yan taraftadır. İmgesi retinanın yan tarafına düşer. Kahve fincanıyla aynı mesafede olduğu için imgesi her iki gözde yaklaşık aynı büyüklükte görünür.

Şimdi de çiçeklerle dolu vazoyu ele alalım. Vazo fincanın arka-



Şekil 2.13 Uzaktaki bir şeye bakarken, iki gözünüz birbirine çok az yakınsar. Yakındaki bir şeye bakarken ise gözleriniz birbirine çok yakınsar. Gözlerimiz arasındaki açıyı ayarlayabilme yeteneğimiz, gözlerimizin ikisini de aynı uyarana odaklamamızı sağlar. Bir nesnenin uzaklığını, gözlerimizin yakınsama açısının ve o nesnenin imgesinin iki göze olan konumunun bilgilerini kullanarak tahmin ederiz.



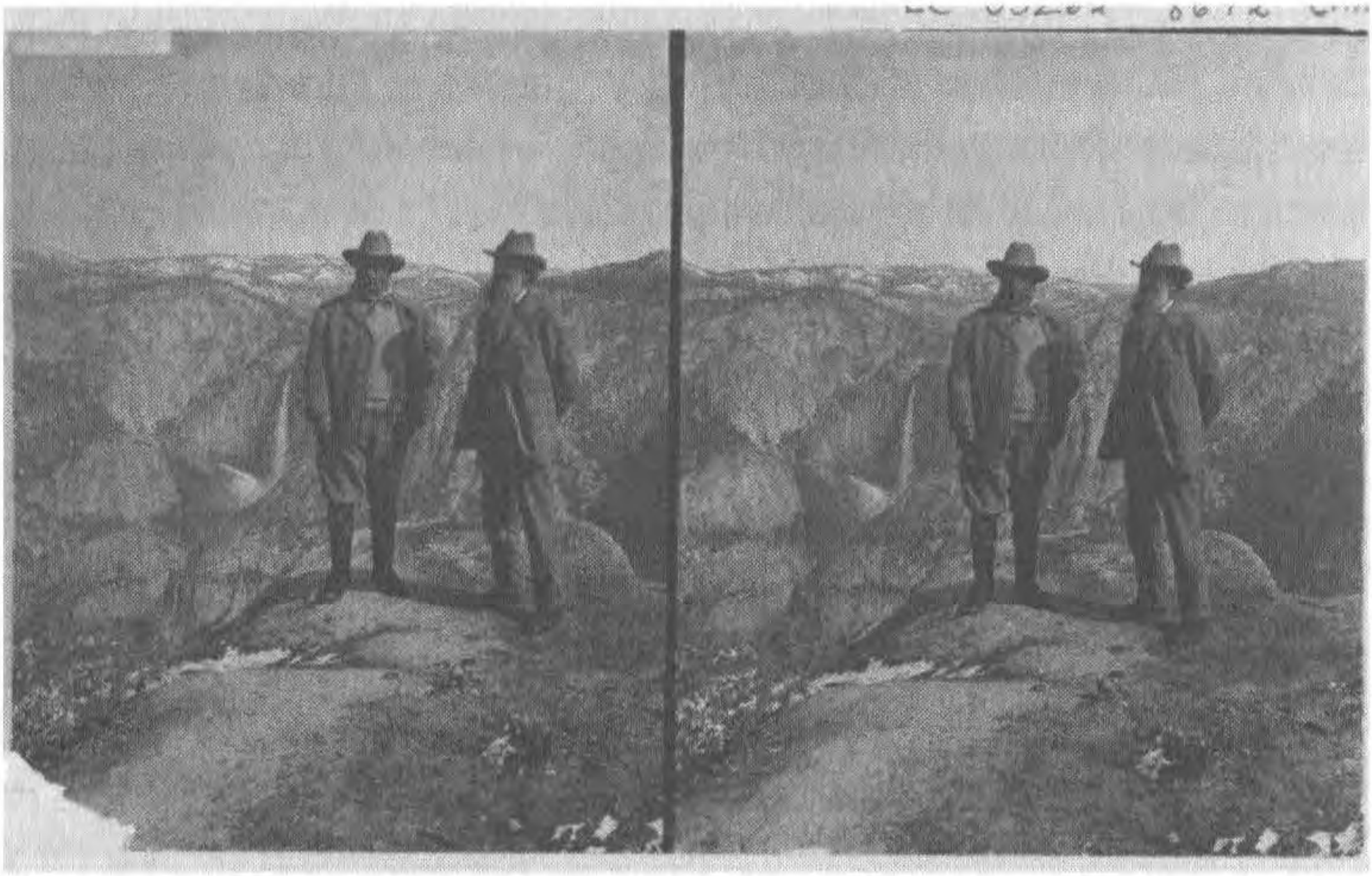
Şekil 2.14 İki gözün sahnedeki gözlem noktaları farklıdır. İmgenin iki gözdeki konumları arasındaki farklar, nesnelerin mesafeleriyle ilgili bilgi oluşturabilir. İki nesnenin sol ve sağ gözdeki versiyonları aynı konumları işgal ediyorsa, beyin buradan bu iki nesnenin yaklaşık aynı mesafede olduğu sonucunu çıkarır. Bu çizimde, kahve kupasıyla armut aynı mesafededir ve imgeleri her iki gözün retinası üzerinde birbirinden aynı mesafeyle ayrılır. Sol ve sağ gözdeki versiyonları farklıysa, bu bir nesnenin diğerinden daha uzakta olduğuna işaret eder. Burada, aralarındaki mesafe fazla olduğu için vazonun sol gözdeki imgesinin kahve kupası ve armut imgelerine göre konumu, sağ gözdeki konumundan farklıdır.

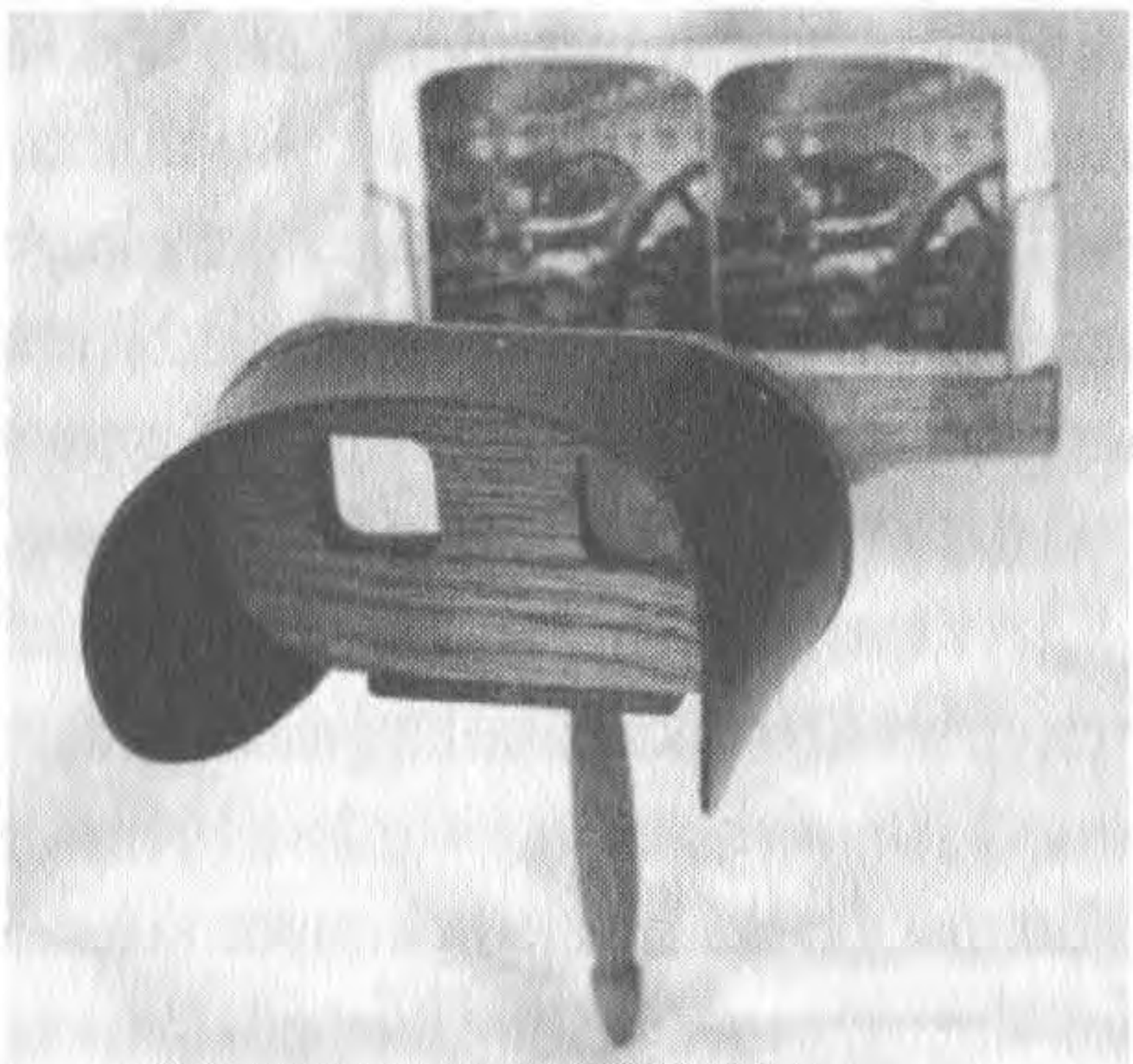
sında ve sol gözün hizasındadır, dolayısıyla retinadaki konumu önünü biraz kapatan fincanın konumuyla hemen hemen aynıdır. Sağ gözde ise vazonun imgesi fincanın yanında yer alır. Fincanın imgesini, iki gözün retinasında da aynı yerde veya birbirine eşit olduğu için bir belirteç olarak kullanabiliriz. Sağ gözde fincanın imgesinin konumu ile vazonun imgesinin konumu, vazonun gözlerin sabitlendiği noktadan ne kadar uzakta olduğuna bağlıdır. (Gözlerin ikisi de vazoya kaydığında vazonun imgesi de iki gözün içinde merkeze kayacaktır.) Mesafeyi tahmin etmek için iki gözün gördüğü imgeleri karşılaştırma yeteneği stereovizyon adıyla bilinir.

Fotoğrafçılar ile film yapımcıları, düz resim ve görüntülerin üç boyutlu görünmesini sağlamak için stereovizyon tekniğinden nasıl yararlanacakları konusu üzerinde yıllarca çalışmışlardır. Burada işin püf noktası iki gözde, birbirinden biraz farklı olacak, gerçek derinliği sağlayan doğal farklılıkları taklit edecek ve ikna edici bir uzaklık hissi yaratacak iki imge oluşturmanın bir yolunu bulmaktır.

Yıllar önce büyükannemde, 1836'da icat edilen, stereoskop denilen eski bir alet vardı. Stereoskoplarda (Şekil 2.15) yan yana duran iki fotoğraf vardır, fotoğrafların arasında bir engel bulunur, böylece sol göz yalnızca soldaki fotoğrafı, sağ göz de yalnızca sağdaki fotoğrafı görür. İki fotoğraf biraz farklı konumlardan çekilirse, bu fotoğraflar içlerinde beyninizin farklı uzaklıklar olarak yorumlayacağı farklılıklar barındıracaktır. Fotoğraflar birbirlerine çok benzedikleri için beyniniz onları "kaynaştıracak", yani iki gözün aynı sahneye baktığı gibi makul bir sonuca varacaktır. Beyniniz iki gözün gördüğü fotoğraflardaki küçük farklılıkları karşılaştırarak sizin iki boyutlu iki ayrı fotoğraftan ziyade üç boyutlu tek bir sahneye baktığınız algısını oluşturacaktır.

1850'lerde stereoskobun ilginç bir yararı keşfedildi: sahte para tespiti. Gerçek olduğu bilinen bir banknot ile sahte olduğundan şüphelenilen bir banknot stereoskobun iki tarafına yerleştirilir. Şüpheli banknot gerçeğinin bire bir kopyası değilse, konumundan biraz sapan yerler olacak ve bu yerler dışarı taşacak veya derinlikte geri planda kalacaktır. "In God We Trust" ("Tanrı'ya Güveniyoruz") yazısı, eğer kelimeler her iki parada aynı yerde değilse, daha yakına doğru gelecek veya biraz daha geri planda kalacaktır. Konumdaki





Şekil 2.15 Sağda stereoskop, yukarıda ise stereograf adıyla bilinen fotoğraf çiftinin yakından görünüşü yer alıyor. Bu stereograf, John Muir ile Theodore Roosevelt'in Yosemite'da biraz farklı kamera konumlarından çekilmiş neredeyse birbirinin aynı iki fotoğrafından oluşuyor. Bu iki kamera konumu, sahneyi çıplak gözle gördüğünüzde iki gözünüzün işgal edeceği konumları taklit eder. Fotoğraflara yakından baktığınızda bazı farklılıklar dikkatinizi çekecektir: Soldaki fotoğrafta, Yosemite Şelalesi Theodore Roosevelt'in (soldaki kişi) dirseğine sağdaki fotoğraftakinden daha yakındır. Bunun gibi bir fotoğraf stereoskoba yerleştirildiğinde, her göz yalnızca bir fotoğrafı görür. Fotoğraflar arasındaki farklılıklar her gözün retinası üzerinde farklı imgeler oluşturur, beyin de bunu sahnenin farklı bölümlerinin farklı uzaklıklarda olduğu şeklinde yorumlar.

farklılıklar iki imgenin ardışık biçimde yapılacak kontrolünde fark edilemeyecek kadar küçüktür ama beyin iki gözün aynı uyarana baktığı izlenimi verilerek kandırıldığında bu farklılıklar hemen sırıtır.

Üç boyutlu filmler de stereovizyondan yararlanır. Seyirci tek perdeye baktığından iki göz için birbirinden tamamen ayrı iki imge sunmak mümkün değildir. Perdedeki görsel sahne, iki kamera tarafından çekilen, sonra da perspektiflerindeki farklılığa dokunulmadan birbiri üzerine bindirilen iki görüntüden oluşur. Bu iki unsuru bir gözün veya diğerinin ayırabilmesi ve görebilmesi için her bir göze biraz farklı bir görüş sağlayacak bazı yöntemler kullanılır.

Bunlardan biri, üst üste bindirilmiş ama birbiri üstüne tam oturmayan iki imgeyi birbirinden biraz farklı renklerle göstermektir. Her bir gözün önünde farklı renkte cam olan bir gözlükten bakıldığında, iki gözün gördüğü imge –tıpkı üç boyutlu bir sahnede görüldüğünde olduğu gibi– diğerinden biraz farklıdır. Bunun nasıl olduğunu anlamak için Resim 3'e (s. 107) bakınız. Sahnede iki ana nesne yer alır: hükümet binasının kubbesi ve onun önündeki heykel. Hükümet binası heykelin çok uzağındadır. Bina olağan biçimde, tek bir berrak imge halinde görülür (siyah-beyaz olarak). Heykelin görüntüsü ise üst üste bindirilmiş iki görüntüden oluşur: biri mavi ve sağa kaymış, diğeri kırmızı ve sola kaymış. Bu imgeye bir camı kırmızı bir camı mavi bir gözlükten baktığınızda, kırmızı camdan bakan göz yalnızca mavi imgeyi, mavi camdan bakan göz de yalnızca kırmızı imgeyi görecektir. İki imge de benzer şekilde koyu renkli görünecektir, çünkü kırmızı renkli camdan görülen mavi imge koyu görünür ve aynı şey tersi için de geçerlidir. Hükümet binasının kubbesi siyah-beyaz olduğu için her iki göz de onu görecektir, ayrıca kubbe tek bir imge olduğu için her iki göz de onu aynı yerde görecektir. Ne var ki, binanın kubbesi ile heykelin birbirlerine göre konumları her göz için farklı olacak, bu da heykelin hükümet binasının kubbesinden farklı bir uzaklıktaymış gibi görünmesine neden olacaktır. Gözlüğü doğru şekilde, yani kırmızı cam sol gözde, mavi cam sağ gözde olacak şekilde taktığınızda, heykel hükümet binasından daha yakınmış gibi görünecektir. Camların yerini değiştirdiğinizde heykel, ilkesel olarak, daha uzaktaymış gibi görünmelidir (ama muhtemelen öyle ol-

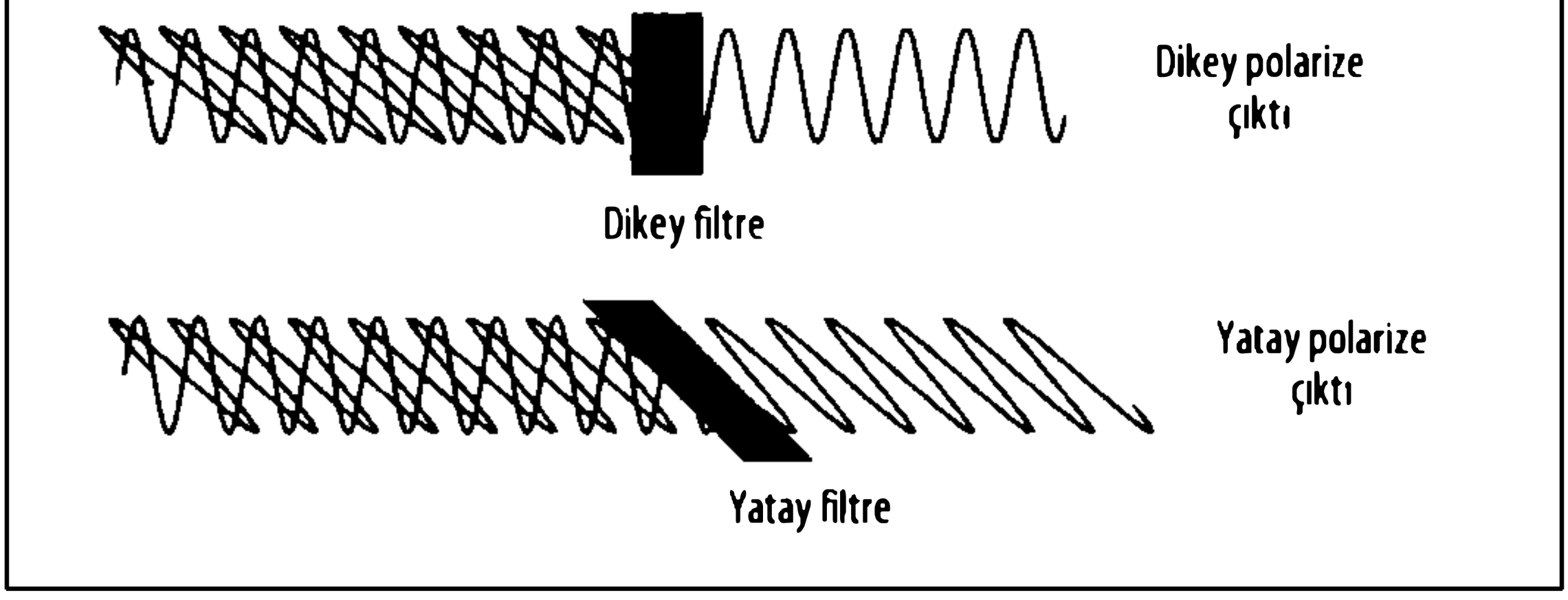
mayacaktır, nedenine biraz sonra geleceğiz).

İki göze farklı imge göstermek için kullanılan diğer yöntemlerse, gözlüklerde perdeli ve polarize camlar kullanmaktır. Perde yönteminde, projeksiyon sistemi, birbirinden ayrı imgeleri hızlı zaman aralıklarında art arda gösterir. Bu iki imge grubundan biri diğerinin biraz dışına taşmıştır. İzleyici, mercekleri hem opak hem şeffaf olabilen perdeli gözlüğü taktığında gözlük, projeksiyon sistemiyle senkronize bir şekilde çalışır ve uygun zamanlarda bir merceği opaklaştırırken diğerini şeffaflaştırır, böylece her iki göz farklı bir imge görür. Perdeleme işlemi aradaki değişimi fark edemeyeceğiniz kadar hızlı gerçekleşir. 60 ile 70 Hz (hertz veya bir saniye içindeki döngü sayısı) arasında gerçekleşen titreşimleri fotoreseptörlerin tespit edemediğini hatırlayın; dolayısıyla, her iki göz için perdeleme bu hızda gerçekleşirse, beyninizi kandırmak hiç de zor değildir.* Her iki imge grubundaki kaymış unsurlar farklı uzaklıklardaymış gibi algılanır.

Polarizasyon yöntemi, hükümet binası ve heykel fotoğrafında incelediğimiz renk yöntemine benzer. Polarizasyonu anlamak için öncelikle ışığın özelliklerine, bilhassa da şaşırtıcı bir şekilde hem dalga hem parçacık özelliği göstermesine bakalım. Işığın bazı yönlerini açıklamanın en kolay yolu onu parçacıklarla kıyaslamaktır. Işık fotonlardan, tekil ışık birimlerinden oluşur. Foton en küçük ışık miktarı olduğu için onu parçacık olarak tahayyül ederiz. Işık aynı zamanda dalga gibi hareket eder ve salınır; salınımın periyodu onun dalga boyudur. Elektromanyetik radyasyonun dalga boyu fotonun ışık olarak görünür olup olmayacağını belirler, görünür ışığın dalga boyu ise bize renk olarak görünür.

Polarizasyon bu salınımların yönlendirilmesiyle ilgilidir (Şekil 2.16). Işık, izlediği yola dik olan her düzlemde salınabilir. El fenerini ileri doğru tuttuğunuzda, ışık demetindeki ışık ileriye doğru yol alırken farklı yönlere doğru salınır ama bu salınımların hepsi ileri yönün dikine gerçekleşir. Işık dalgalarının bazıları sağa sola, bazı-

* Bazı sistemler bu hızın yarısı kadar bir hızla (her göz için saniyede otuz imge veya toplamda altmış imge) çalışır, ki böyle durumlarda göz bazı titremeleri görebilir.



Şekil 2.16 Günümüzde üç boyutlu filmlerde çoğunlukla polarize ışık kullanılır. Bir gözün görmesi istenen imge bir polarizasyonla, diğer gözün görmesi istenen imge de başka bir polarizasyon yönelimiyle yansıtılır. Seyirciler filmi izlemek için, bir göze gitmesi amaçlanan ışığın diğer göze gitmesini önleyen polarize filtreleri olan gözlükler kullanır.

ları yukarı aşağı hareket ederken bazıları da bunların arasında eğik açılar yaparak ilerler.

Polarize ışık sınırlı bir yön aralığında salınan ışıktır. Örneğin güneş ışığı her yönden salınarak gelir ve yüzeylere çarparak yansır, ama bazı konumlarda ışık dalgaları diğerlerine göre daha iyi yansır. Kumsallarda ışık suda sınırlı yönelimlerle yansır. O zaman, yansıyan bu ışığın polarize bir ışık olduğu söylenir.

Işığı dalgalarının yönelimine göre filtrelemek mümkündür. Polarize güneş gözlükleri, su yüzeyinden yansıyan polarize ışığı seçici olarak engelleyerek parlaklığın şiddetini azaltır. Güneş gözlüğünüzü yan çevirdiğinizde sahne daha parlak görünür, çünkü o zaman filtrenin yönü yansıyan ışığın yönüyle çakışarak daha fazla ışığın geçmesini sağlar.

Normalde bunu fark etmeyiz, çünkü gözlerimiz ışığın polarize olup olmadığını veya hangi yönden geldiğini göremez: Işığın bu veçhesinin fotopigment moleküllerimiz üzerinde etkisi yoktur. Film yapımcıları, bir filmi iki gözün ayrı ayrı göreceği imgelere ayırmada polarizasyon konusundaki bu körlüğümüzden yararlanabilirler. Bir göz için ayrılan imge belli bir yönden polarize olmuş ışıkla gösterilirken diğer göz için ayrılan imge dikey yönden polarize olmuş ışıkla gösterilir. Seyirci ekranı, bu şekilde her bir gözün önündeki mer-

ceğin sahnenin yalnızca o gözün görmesi istenen bölümünü görmesine izin veren polarize gözlüklerle seyreder. İki imge, derinlik duygusu yaratmak için kaydırılmış olmaları hariç, aynı görünür. Stereo deneyimi yaratmak için renk kullanılmadığından renkli filmlerde çoğunlukla bu teknik tercih edilir.

Stereovizyon önemli olmakla birlikte derinliği görmenin tek aracı değildir, çünkü kısıtlı bir menzilde iş görür. Uçaktan baktığınızda yeryüzünün düz göründüğünü fark etmişsinizdir. Ağaçların, binaların, tepelerin yüksekliğini kestirmek güçtür. Buradaki sorun, çok uzaklarda olan bir şeye bakarken gözlerimizin birbirine paralel olmasından ve sol ve sağ gözün görüş farklılığının fark edilemeyecek kadar küçük olmasından kaynaklanır. Sahne kilometrelerce uzakta olduğunda, gözler arasındaki birkaç santimlik uzaklık anlamsız kalır. Stereovizyon, yalnızca bir futbol sahasının boyu kadar (90 m civarı) mesafelerde işe yarar ipuçları sunar.

Uzaklıkla ilgili en güçlü ipucunun stereovizyon değil *oklüzyon* olduğu söylenebilir. Bir nesnenin başka bir nesne tarafından örtülmesi beyinde güçlü bir "önde" ve "arkada" duygusu yaratır. Örneğin, bu satırları yazarken ellerim gözlerimle bilgisayar arasında ve klavyedeki bütün tuşları görmemi engelliyor. Bu, ellerimin klavyenin önünde olduğunu söylüyor bana. Heykel ile kubbe fotoğrafına kırmızı-mavi gözlüğünü tersten takıp bakmaya çalıştığınızda, heykeli kubbenin arkasındaymış gibi görmeniz mümkün değildir, çünkü heykelin tamamını görebilirken kubbenin yalnızca bir kısmını görebilirsiniz. Beyniniz hem sahneden gelen önünde-arkasında ipuçları hem de iki gözden gelen stereovizyon ipuçlarıyla karşı karşıya kaldığında, genellikle ilk sözü edilen ipuçlarını kullanmayı tercih eder.

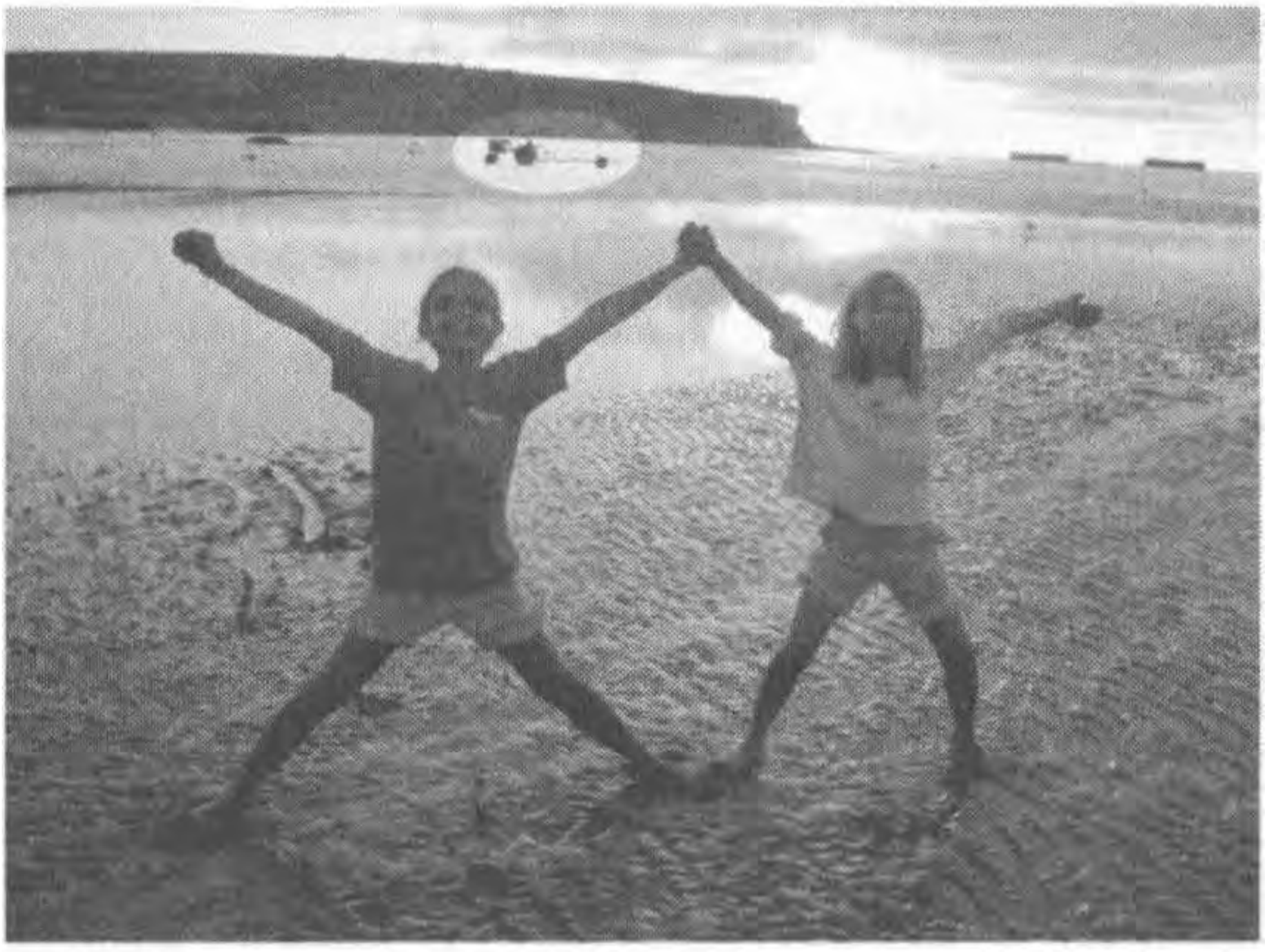
Sürrealist ressam René Magritte resimlerinde oklüzyonun ne kadar güçlü olabileceğini tasvir eder (s. 107, Resim 4). Bu tablo şaşırtıcıdır, çünkü Magritte oklüzyonu uzaklığa dair diğer ipuçlarıyla yarıştırır ve derinliği sahnenin çeşitli bölümlerinde farklı görmemizi sağlar. Resmin sol üst köşesine doğru, binicinin hemen üstüne ve sol tarafına baktığınızda, oklüzyondan hangi ağaçların atın ve binicinin önünde, hangilerinin arkasında kaldığına dair net bir izlenim elde edersiniz. Ama sahnenin o bölümünde var olan önde ve arkada

olma durumu resmin diğer bölümlerinde aynı şekilde devam etmez. Binicinin sağ omzunu gizleyen küçük ağaca bakın. Ağacın gövdesini aşağıya doğru izlediğinizde, onun daha büyük bir ağaç tarafından kısmen örtüldüğünü görürsünüz. O büyük ağacı yukarı doğru izlediğinizde ise onun binici ile atın arkasında kaldığını görürsünüz.

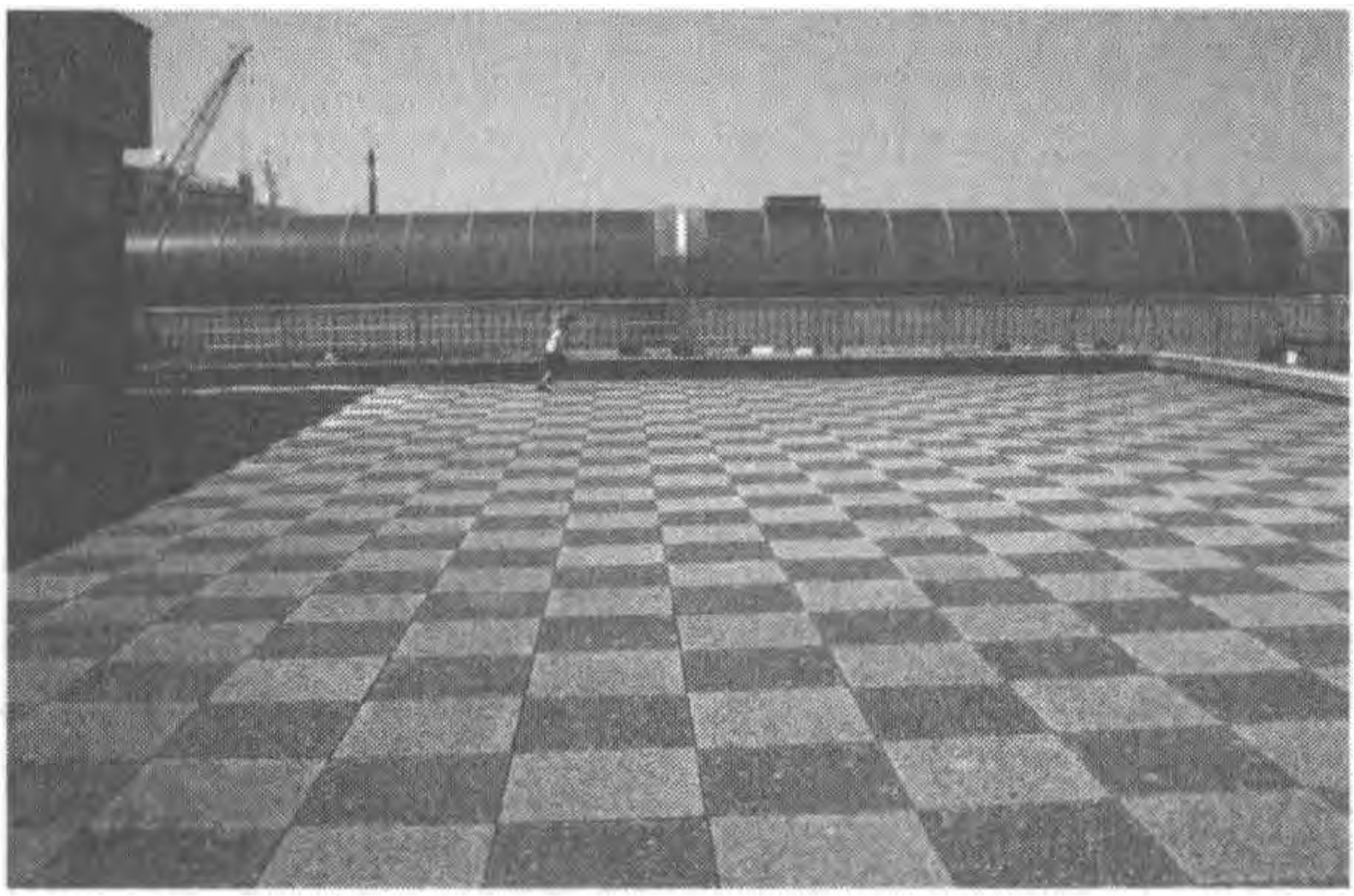
Magritte bu tuhaf numarasında, oklüzyon ile *sis* –üç boyutlu mekân için bir başka ipucu– arasındaki tezattan da yararlanır. Hava uzaktaki nesnelerin puslu ve renklerinin hafif mavi görünmesine yol açar. Uzaktaki dağ sıraları yakındakilere oranla daha bulanık ve mavi görünür. Burada Magritte, arka planda görünmelerini sağlamak için bazı bitki örtülerini bulanık ve mavi tonda resmeder. Sonra da o sözde arka planda olan bitki örtüsünün bir şeridini at ile binicinin önüne yerleştirir; böylece bitki örtüsünün uzaklığı konusunda bizi çelişkide bırakarak aklımızı bir kez daha karıştırmayı başarır.

Uzaklıkla ilgili ipuçlarından biri de *göreli büyüklüktür*. Bir nesne uzaktayken retinaya, aynı nesne yakında olduğundayken yansıyandan daha küçük bir imge yansır. Bir şeyin ne kadar büyük göründüğü onun ne kadar uzakta olduğuna dair bir fikir verir insana. Genelde büyüklüğü uzaklık için bir belirteç olarak kullandığımızın farkına varmayız pek. Şekil 2.17'deki fotoğrafta beyniniz çocukların önde, traktörün uzakta olduğu sonucuna varır hemen, bu izlenimin retinanızın ne kadarının çocukların, ne kadarının traktörün imgesinin işgali altında olduğu karşılaştırmasından kaynaklandığını fark etmeden hem de.

Nesnenin büyüklüğüyle ilgili beklentileriniz uzaklık yorumunuzu etkiler. Bir keresinde California'da tepelerde yürüyüşe çıkmış ve yol üzerinde bir tarantulayla karşılaşmıştım. İki kere şaşkınlığa uğradım, çünkü öncelikle karşılaştığım şey bir tarantulaydı, ikincisi de ilk anda onun bana olduğundan daha yakın olduğunu düşünmüştüm. Beynim, retinadaki imgesi o kadar büyük olan bir örümceğin çok yakında olması gerektiği sonucuna varmıştı. Onun o kadar yakında olmadığını, sadece görmeye alıştığım örümceklere göre çok büyük olduğunu anlamam biraz zaman aldı. (O noktada çoktan bir-iki metre geriye sıçramış, o yoldan gitmesem mi acaba diye düşünmeye başlamıştım.)



Şekil 2.17 Büyüklük mesafeye göre değişir: Çocuklar traktörden büyük değildir, daha yakındırlar.



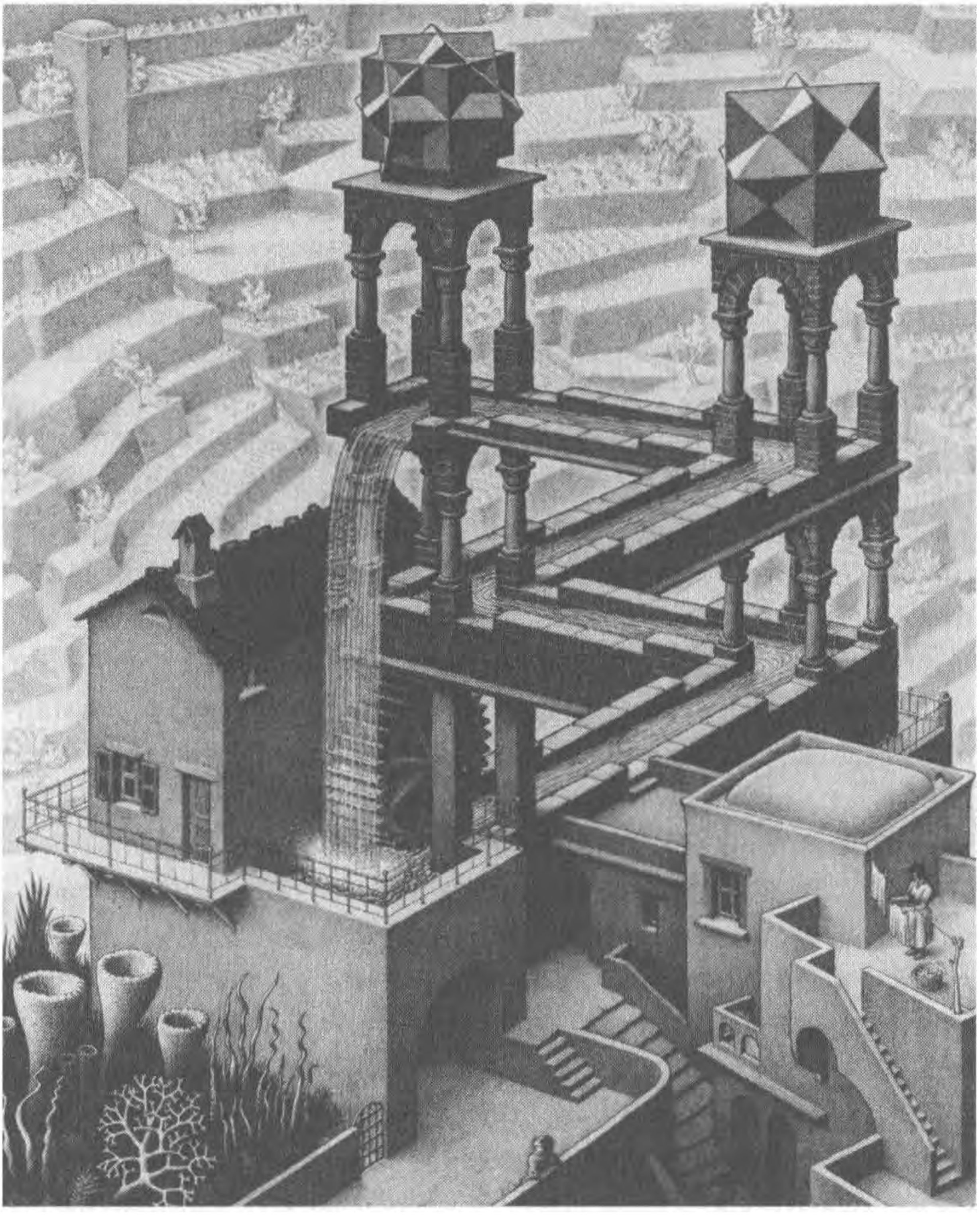
Şekil 2.18 Taşlar uzaklaştıkça küçülüyormuş (ve daha eğikmiş) gibi görünür. Aslında birbirlerine paralel ve kare biçiminde olmayı sürdürürler. Paralel çizgilerin bu şekilde birleşiyorlarmış gibi görünmeleri göreli büyüklük ipuçlarından kaynaklanır. Taşlar uzaktayken daha küçük, dolayısıyla kenarları birbirine yaklaşmış gibi görünür.

Magritte'in tablosunda (s. 107, Resim 4) büyüklükle ilgili bir belirsizlik de vardır. Küçük bir ağaç gövdesi aslında büyük de uzakta olduğu için mi öyle görünür, yoksa gerçekten de yakında ve küçük bir ağaç mıdır? Arkadaki gelişkin bir ağaç mıdır, yoksa izleyiciye yakın bir çalı mı?

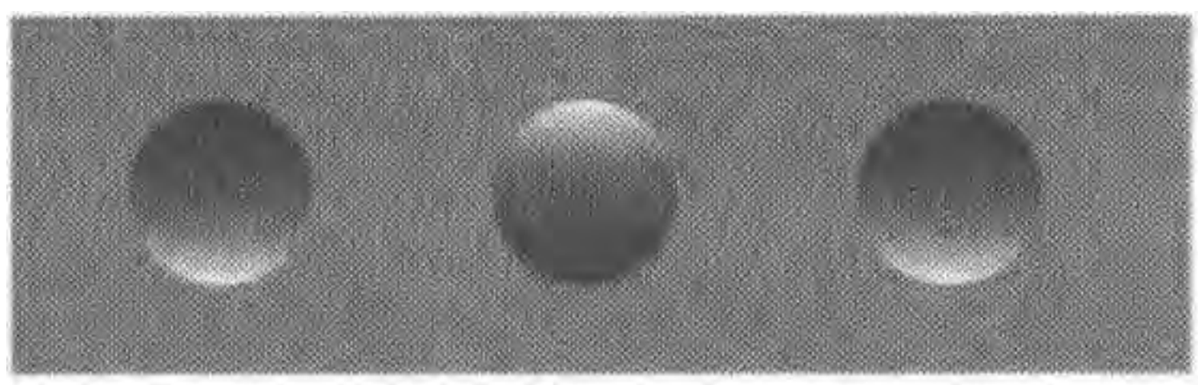
Büyüklük karşılaştırması, *doğrusal perspektif* adıyla bilinen uzaklığa dair ipuçlarından biridir. Doğrusal perspektif terimi, birbirine paralel çizgilerin uzaklara doğru uzandıklarında birleşiyormuş gibi görünmelerine atıfta bulunur, tıpkı Şekil 2.18'deki gibi. Fotoğraftaki taşlar ne kadar uzaktaysa o kadar küçük (ve yatay) görünür. Ama aslında birbirine paralel ve kare olmayı sürdürürler. Bu algı, göreli büyüklük ipuçlarından kaynaklanır. Taşlar uzaktayken daha küçük, dolayısıyla kenarları birbirine yaklaşmış gibi görünür. Doğrusal perspektifi resme ilk taşıyan kişi, on beşinci yüzyılda yaşamış Floransalı sanatçı Filippo Brunelleschi'dir. Brunelleschi, bir binanın gerçekte paralel olan konturlarını bir aynanın yüzeyine çizip uzattığında, bu çizgilerin belli bir ufuk noktasında birleştiklerini fark etmişti.

M. C. Escher de resimlerinde Magritte gibi çoğunlukla derinlik ipuçlarından yararlanmış ve resimlerinin belli bölgelerinde akla yatkın ve gerçekçi gelen ama sahnenin tamamı değerlendirildiğinde imkânsız görünen unsurlar kullanmıştır. *Şelale* (Şekil 2.19) adlı resminde, doğrusal perspektif ve oklüzyon, sağdaki kulenin iki katlı olduğu, birinci ve ikinci katlarda iki ayrı su kanalı bulunduğu algısını destekler. Ama sahnenin bütününe baktığınızda, aynı kanalın birinci ve ikinci katı birleştirdiğini ve düz bir hatta ilerliyormuş, hatta birinci kattan ikinci kata doğru hafif alçalıyormuş gibi göründüğünü görürsünüz.

Escher bu resminde dünyanın üç boyutlu şekline dair bir başka ipucu daha kullanır. Beynimiz ışığın genellikle üstten geldiğini farz eder. Genelde uygun olan bu varsayım, tümsek yapan biçimlerle içeri gömülmüş biçimleri birbirinden ayırt etmemizde bize yardımcı olur. Şekil 2.20'deki resme baktığınızda bir çukur, bir tümsek ve bir başka çukur göreceksiniz. Şimdi resmi ters çevirin. Öncesinde çukur görünen yerler tümsek, tümsek görünen yerler çukur görünecektir. Işığın yukarıdan geldiği varsayımı, üst kısmı açık, alt kısmı koyu



Şekil 2.19 M. C. Escher'in *Şelale* adlı ünlü resmi, doğrusal perspektif ve oklüzyondan yararlanarak imkânsız bir üç boyutlu yapı yaratır. Suyun akışını izleyin.
© 2013, M. C. Escher Company, Hollanda. Bütün hakları saklıdır.



Şekil 2.20 Bu dairelerin zemine göre tümsek veya çukur görünmesi, ışığın nereden geldiğini düşündüğünüze bağlı olarak değişir. Beynimiz ışığın yukarıdan geldiğini varsayar, dolayısıyla ortadaki yuvarlağı tümsek, diğer ikisini çukur olarak algılar. Şekli tersine çevirdiğinizde, çukurlar tümsek, tümsekler çukur haline gelir. Nesnenin şekline dair ışık ve gölge örüntüsüne dayanan algımız *tonlamadan şekil üretme* adıyla bilinir.

olan imgeyi dışbükey (alt kısmı gölgede kalmış), üst kısmı koyu, alt kısmı açık olan imgeyi ise içbükey olarak yorumlamanıza neden olur. Bu işleme *tonlamadan şekil üretme* adı verilir. Escher'in resminde tonlamadan şekil üretme işlemi, yatay yüzeylerin açık, dikey yüzeylerin koyu göründüğü terasların merdivenlerinde görülebilir.

Beyninizin görsel mekânı oluşturmak için yararlandığı kurallardır bunlar, iki boyutlu bir veri bütününü üç boyutlu dünyaya dair zengin bir zihinsel modele dönüştürmenin reçetesidir. Ama hikâyemiz tamamlanmış sayılmaz. İki nedenle: Birincisi, üç boyutlu dünya tümüyle görsel değildir. Görme her ne kadar kendine özgü mekânsal özellikleri olan güçlü bir duyu olsa da, neyin nerede olduğunu bilmemizi sağlayan tek aracımız değildir. İkincisi, beynin *ne* yapıyor olabileceğini bilmek, onun bunları *nasıl* yaptığını bilmekle aynı şey değildir. Beynin dünyadaki ışığın mekânsal örüntüsünü nasıl ölçtüğünü keşfettik, uzaklıkla ilgili çıkarımlarda bulunurken yapılan kestirimlerin bazılarını gördük ve zihinde üç boyutlu bir taslağın nasıl oluşturuluyor olabileceğine dair bir fikir edindik. Ama beynin bu kuralları gerçekte nasıl uyguladığıyla (nöron popülasyonlarının gerekli ölçümleri nasıl yaptıklarıyla) ilgili sorunun henüz yalnızca yüzeyini kazıdık. Önümüzdeki bölümlerde bu konuyu keşfetmeye başlayacağız.

3

Kendi Şeklimizi Hissetmek

BU SABAH, öğle yemeğinde içmek için kendime buzlu çay yaptım. Telaşlıydım ve bardağın dışını kurulamamıştım, dolayısıyla bardak parmaklarımın arasından kayıp da mutfak tezgâhının üzerine boylu boyunca çay dökülünce şaşırmamam gerekirdi. Parmaklarımla yeterince baskı uygulayamamış, bardağı tutamamıştım. Geçmişte bana atılan çok sayıda beyzbol topunu yakalamakta da hep başarısız olmuşumdur, en kolay pasları bile tutabildiğimi hatırlamıyorum. Gerçi yürüyüş ve koşu konusunda oldukça iyi sayılırım ve epeyce alıştırmadan sonra banjoyu daha iyi çalmaya başladım.

Bütün bu eylemleri başarmak, vücudunuzun her bölümü hakkında kesin bilgi sahibi olmayı gerektirir. Peki, siz (veya beyniniz) bedeninizin nerede olduğunu nasıl biliyorsunuz? Verili kabul ettiğimiz bir şeydir bu. Yeni başladığınız bir dansın adımlarını öğrenirken ayaklarınızın duruşuna odaklanırsınız. Ama bir beceriyi ilk kez öğrenmiyorsak veya yaptığımız şey ip üstünde yürümek gibi hata kabul etmeyen çok zor bir iş değilse, vücut bölümlerimizin nerede olduğu konusunda kafa yormayız.

Görme konusunu işlerken gördüğümüz üzere, bunun için ne bilmek istediğimizi (yani bu konu özelinde, vücudumuzun kas ve eklemlerinin durumunu) ölçebilen sensörler gerekir. Bu sensörler beyne, kaslarınızın nasıl kasıldığını ve uzuvlarınızla eklemlerinizde nasıl bir güç bulunduğunu bildiren sinyaller gönderir. Ama bu sensör-

lerin yaptığı ölçümler, vücudunuzun konumuyla dolaylı ve belirsiz bir ilişki içindedir. Beyniniz bu sensörlerden gelen sinyallerden iskeletinizin mekân içindeki konfigürasyonunu çıkarsamak durumundadır.

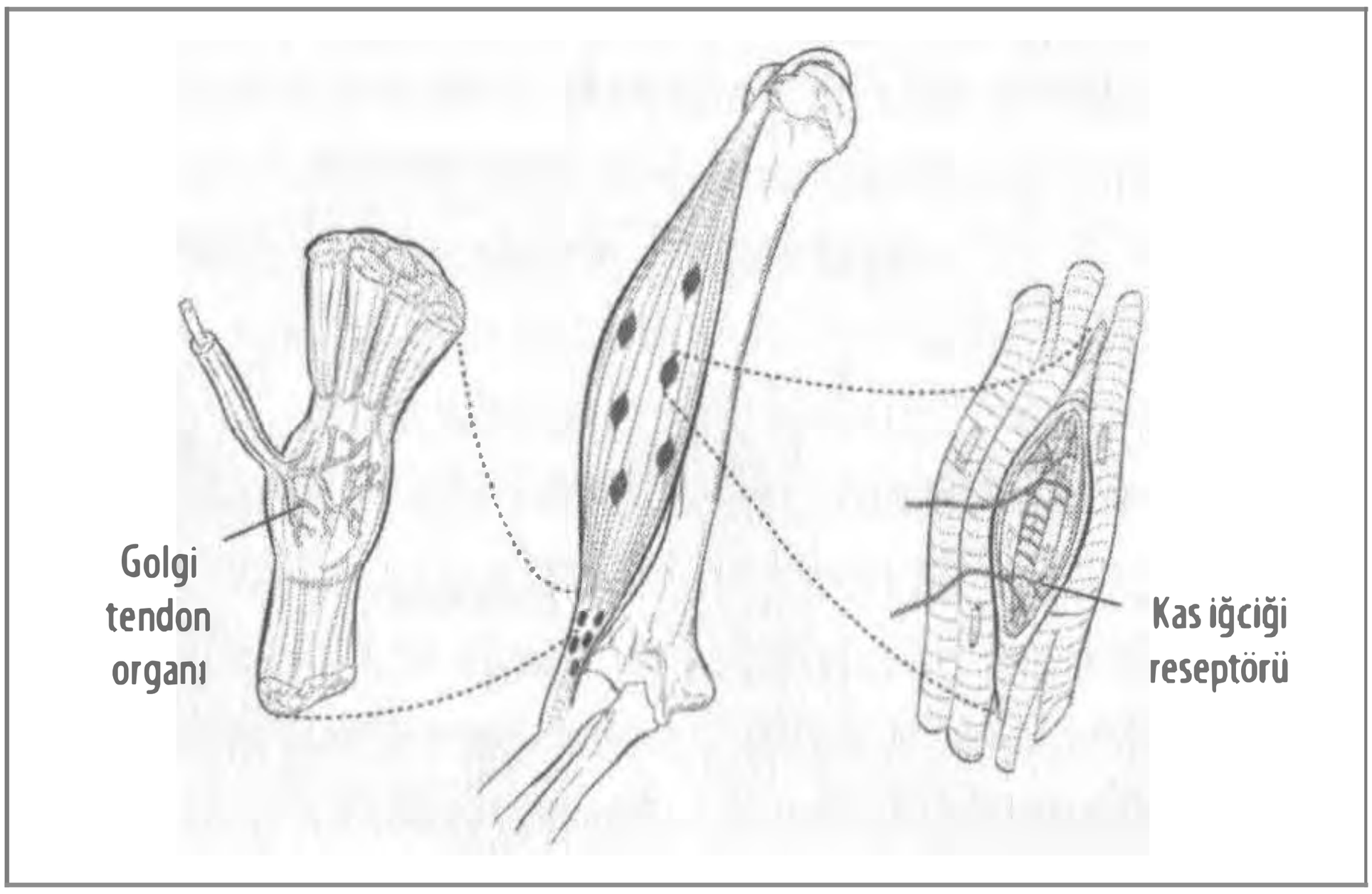
Beyninize vücudunuzun konumu hakkında iki tür sensör bilgi verir. Bir türü kaslarınızın içindedir ve biraz makaraya veya iğe benzer, etrafına sinir lifleri sarılmıştır. Bu nöron türüne *kas iğciği reseptörü* adı verilir; bu reseptör kasın uzunluğunu ölçer. Kas iğciği reseptörleri her kas lifi üzerinde bulunur ve kasla birlikte kasılırlar (Şekil 3.1). Kas iğciği reseptörlerinden gelen mesajlar beyne, bir eklemin konumundan hareketle o ekleme bağlı kaç kasın kasıldığına dair bilgi sağlar.

Örneğin, üst kolunuzdaki (bisepsleriniz ile trisepslerinizdeki) kaslar ön kolunuzun hareketinden ve dirseğinizin açısını değiştirmekten sorumludur. Biseps kası kasıldığında kısalarak dirseğinizin bükülmesine neden olur ve ön kolunuz üst kolunuza doğru yaklaşır. Ön kolunuz ile üst kolunuz arasındaki açı daraldığı için bisepsteki kas iğciği reseptörleri rahatlar ve bisepslerin gevşemesine neden olur. Dirseğinizi kıvırdığınızda, kolunuzun arka kısmındaki triseps kasları uzar ve bu kaslardaki kas iğciği reseptörleri gerilir.

Bütün mesele bundan ibaret olsaydı, dirseğinizin açısını belirlemek için ön kolunuzun her iki tarafındaki kas iğciklerindeki gerilim derecelerini karşılaştırmak yeterli olurdu. Biseps kas iğcikleri uzunsa, dirseğiniz düz ve kolunuzu tamamen uzatmış durumdasınız, triseps kas iğcikleriniz uzunsa, kolunuz tamamen kasılmış ve dirseğiniz bükülmüş demektir. Ama olay bununla bitmiyor.

Buzlu çayla dolu bardağı düşürdüğümde, sorun yalnızca elimin konumuyla alakalı değildi, baskıyla da alakalıydı. Elim bardağı mükemmel biçimde tutacak bir şekle sahipti ama ben bardağa parmaklarımın arasından kayıp düşmesini önleyecek kadar kuvvet uygulamamıştım. Kuvvet vücudun başka bir sensörü tarafından, yani Golgi tendon organlarınca (adının aksine organlardan değil nöronlardan oluşur) ölçülür.

Golgi tendon organları bir tarafta kasa, bir tarafta da tendon ve kemiğe bağlıdır (Şekil 3.1). Bu nöronlar, kas iğciği reseptörleri gibi, gerilmeye karşı hassastır ama gerilimi farklı bir yerde ölçerler. Golgi

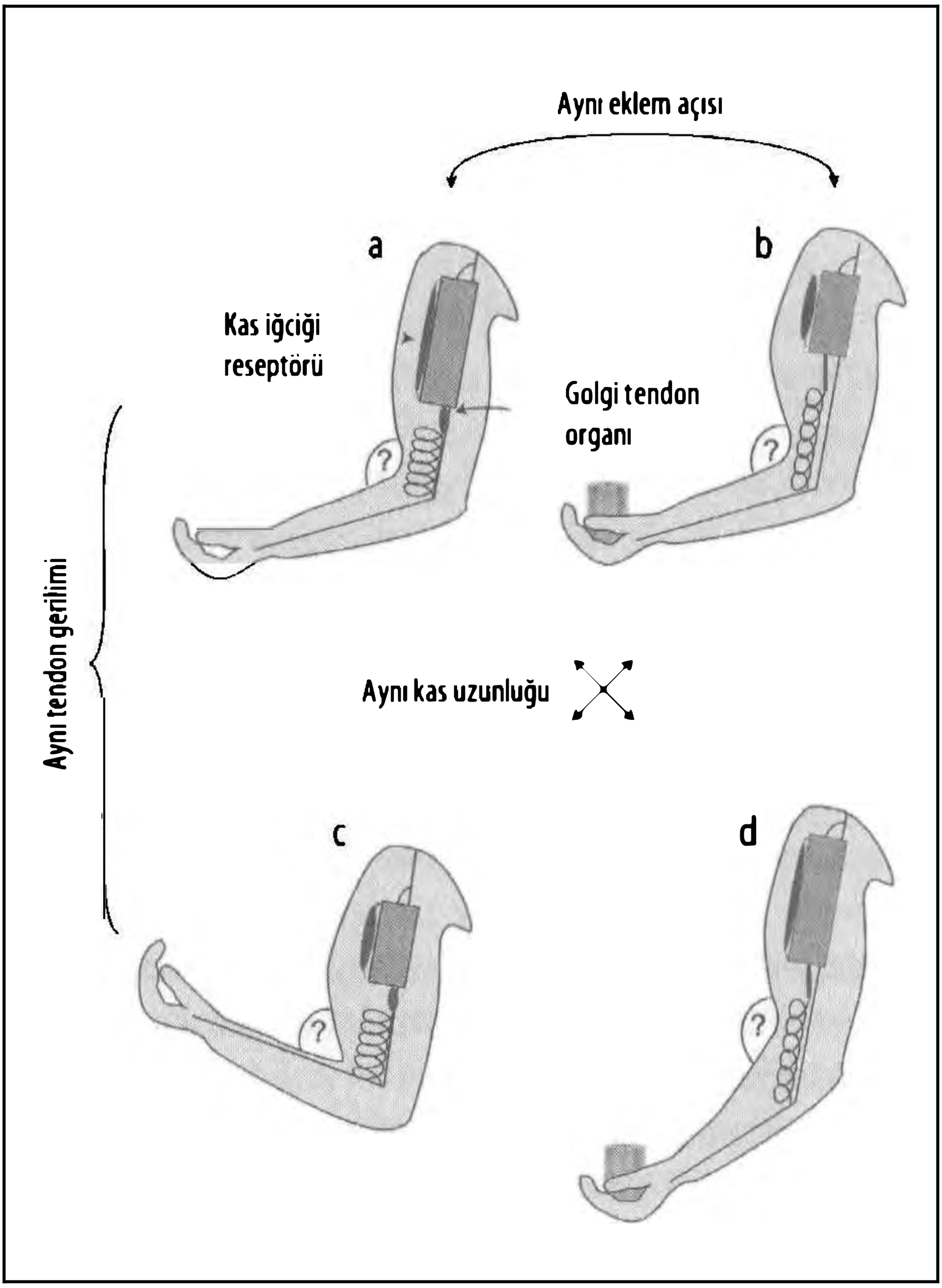


Şekil 3.1 Beyin eklemlerin konumlarını, kas ve tendonlardaki gerilmeye hassas duyu reseptörlerinden aldığı sinyalleri yorumlayarak çıkarsar. Kas iğciği reseptörleri kasların içindedir ve kasa kasılma kuvveti veren ana liflerle paralel biçimde sıralanmıştır. Bu reseptörler kasın uzunluğunu kontrol eder. Golgi tendon organları, kas lifleri ile tendonların birleştiği noktalarda bulunur. Bu organlar kasın tendona ne kadar kuvvet uyguladığını kontrol eder.

tendon organları kas iğcikleri gibi kas boyunca uzanmaz; kasa diziler halinde, yani onunla aynı hat üzerinde bağlanırlar. Kas kasılınca Golgi tendon organları gerilir.

Kas iğciği reseptörleri ile Golgi tendon organları gereklidir çünkü kasın kasılma (ve uzuvların hareket) biçimi, ne kadar ağırlık taşıdıklarına bağlı olarak değişir. Eliniz boşsa, biseps kasınızdaki belli bir kuvvet dirseğinizi doksan derecede tutar (örneğin bkz. Şekil 3.2a). Eklem açısıyla ilgili çıkarımda bulunulurken ya (kas iğcik reseptörünün algıladığı) kasın uzunluğundan ya da (Golgi tendon organının algıladığı) kasın tendona uyguladığı kuvvetten yararlanılır.

Ama elinizde ağır bir şey tutuyorsanız, kolunuzu aynı konumda tutabilmeniz için daha fazla gerilim gerekir. Bu kuvveti elde etmek için kas daha fazla kasılır, daha fazla kısalır ve tendonu elinizdeki ağırlığa denk bir kuvvetle çeker (Şekil 3.2b). Elinizde ağır bir şey varken aynı eklem açısını koruduğunuzda, kas iğciği kasın kısaldığı, Golgi tendon organı da elinizde bir şey olmadığı zamankinden daha fazla kuvvet uygulandığı sinyalini gönderir. İki duyu reseptöründen gelen sinyaller beyinde bir şekilde harmanlanır ve beyniniz dirseği-

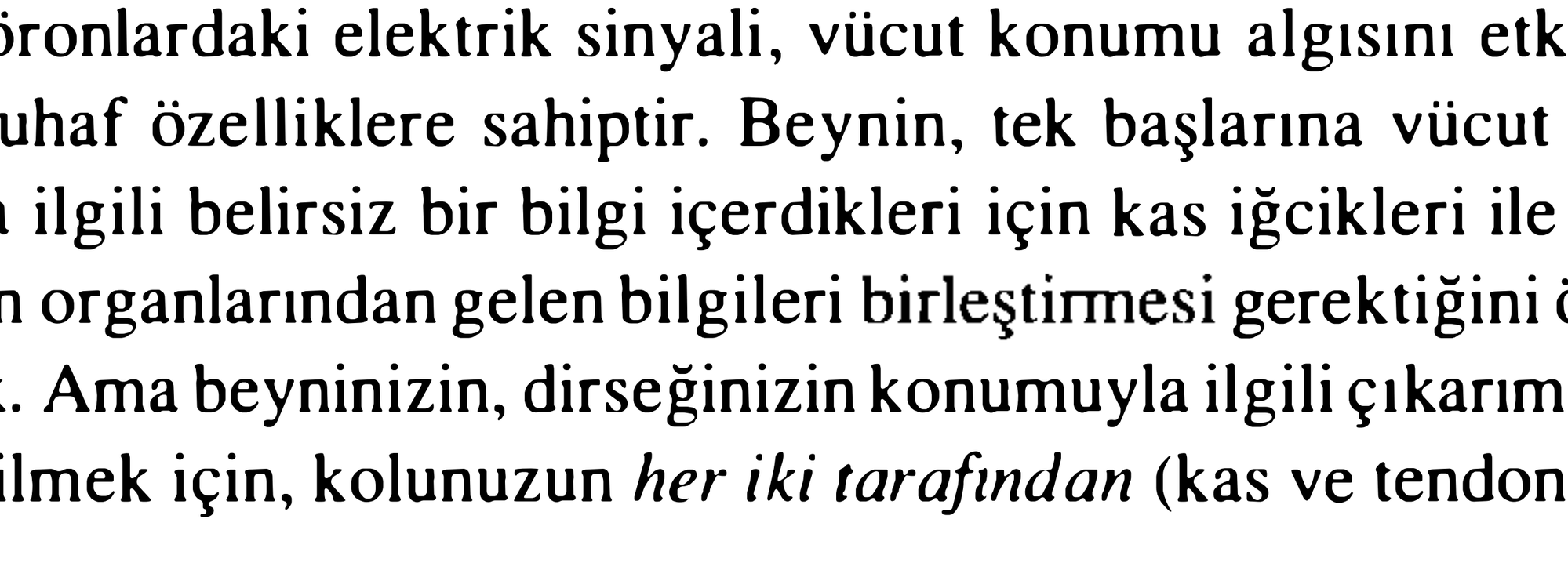


Şekil 3.2 Kas uzunluğu, kuvvet ve eklem açısı arasındaki ilişki, taşıdığınız şeye göre değişir. Hiçbir şey taşımıyorsanız (*a*), biseps kasınızın kolunuzu belli bir konumda tutmak için fazla kasılması gerekmez. Elinizde ağır bir şey tuttuğunuzda ise (*b*) biseps kasınızın kolun aynı konumu muhafaza etmesini sağlamak için daha fazla kasılması gerekir. Kas kasıldığında kısalır, bu da tendonun gerilip uzamasına neden olur. Kolunuz aynı konumda ama elinizde bir şey yokkenki duruma kıyasla Biseps Golgi tendon organı daha fazla gerilir, kas iğciği reseptörü ise daha az gerilir. Aynı kas uzunluğu, taşınan nesnenin ağırlığına bağlı olarak farklı eklem açılarına (*a* ve *d*, *b* ve *c*'de olduğu gibi) karşılık gelebilir. Keza, tendon üzerindeki aynı miktardaki gerilim farklı eklem açılarına (*a* ve *c*, *b* ve *d*'de olduğu gibi) karşılık gelebilir. Beyin vücudun konumunu öğrenmek için, bu farklı sensörlerden gelen okumaları birleştirerek taşınan ağırlıktan bağımsız, güvenilir bir cevap elde eder.

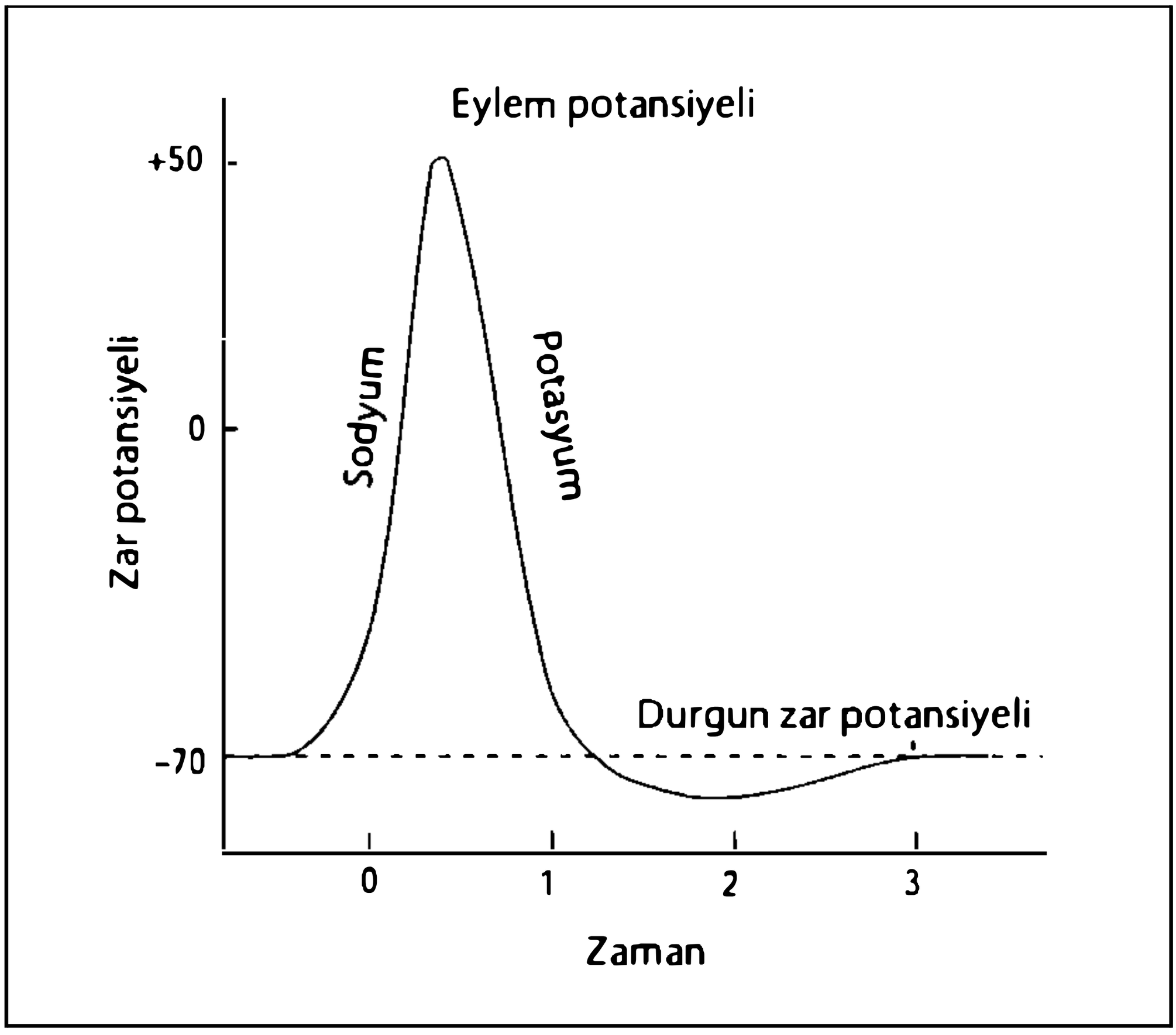
nizin çok mu kıvrıldığı, yoksa elinizde ağır bir şey mi taşıdığınız konusunda çıkarımda bulunur. Benzer işlemler parmaklarınızda, ellerinizde, ayaklarınızda, ayak parmaklarınızda, boynunuzda, yani vücudunuzdaki bütün eklemlerde gerçekleşir.

Gerilme bu reseptörlerdeki elektriği etkiler. Görme konusunda gördüğümüz gibi, buradaki işlemde iyonlar, hücre zarında bulunan ve iyonların geçebileceği büyüklükte olan delikler ve zincirleme tepkime rol oynar. Ama burada bu işlemin gerçekleşme biçimi biraz farklıdır. Burada bir kas iğciği reseptörünün veya Golgi tendon organ reseptörünün gerilmesi, nöron içindeki elektriğin bir dizi biyokimyasal tepkime sonucu dolaylı olarak değişmesine neden olmaz; muhtemelen nöron zarı üzerindeki bazı gözeneklerin gerçek anlamda açılmasına neden olur. Bundan emin değiliz ama zarı çekiştirmenin, tıpkı bir süngeri çekiştirmenin deliklerinin genişlemesine neden olması gibi, nöron zarı üzerindeki gözeneklerin açılmasına neden olduğunu tahayyül etmek zor değil (Şekil 3.3).[1] Kapılar açıldıktan sonra iyonlar içeri akarak nöron içinde elektriksel değişimlere neden olur. Nöron zarının mekanik durumu nöronun elektriksel durumunu bu şekilde belirler.

Nöronlardaki elektrik sinyali, vücut konumu algısını etkileyen bazı tuhaf özelliklere sahiptir. Beynin, tek başlarına vücut konumuyla ilgili belirsiz bir bilgi içerdikleri için kas iğcikleri ile Golgi tendon organlarından gelen bilgileri birleştirmesi gerektiğini öğrenmiştik. Ama beyninizin, dirseğinizin konumuyla ilgili çıkarımda bulunabilmek için, kolunuzun *her iki tarafından* (kas ve tendon grup-



Şekil 3.3 Bir nöronun gerilmesinin nöron zarı üzerindeki gözeneklerin açılmasına neden olduğu ve aralarından iyonların geçmesini sağladığı düşünülüyor.



Şekil 3.4 Sinir sistemi içindeki birçok nöronda olan tipik bir eylem potansiyeli. Eylem potansiyelleri, nöronun zarındaki birçok farklı iyon kanalının açılıp kapanması sonucu oluşur. Bir şey nöronun durgun potansiyelinin pozitif yöne biraz kaymasına neden olduğunda, voltaja duyarlı sodyum kanalları açılır ve nöronun içine sodyum akar. Zar potansiyeli yükselir ve neticede potasyum kanallarının açılmasını sağlar. Sonra potasyum iyonları dışarı çıkarak nöronun elektrik potansiyelinin tekrar ilk durumuna dönmesine neden olur.

larından) gelen bilgileri de birleştirmesi gerekir. Bu gerekliliğin nedenlerinden biri, beyninizin negatif sayılarla "arasının iyi olmaması", uzvun yalnızca bir tarafındaki sensörleri kullanarak uzvun muhtemel konumlarını bütünlüklü biçimde kodlayamamasıdır.

Bunun nedenini anlama çabamız, bu nöronlardaki elektrik sinyallerinde rol oynayan belli iyonlara ve *eylem potansiyeli* adı verilen bir sinyal türüne getirir bizi. Eylem potansiyelleri, beyindeki ve sinir sistemindeki birçok nöronun elektriksel bilgisinin dolaşımını sağlar. Bir eylem potansiyeli, yaklaşık 1 ila 2 ms (milisaniye) süren çok hızlı bir atımdan oluşur (Şekil 3.4). Nöronun voltajı negatif değerden (nöron içinde daha fazla elektron bulunma durumundan) pozitif değere (nöronun dışında daha fazla elektron bulunma durumuna) yük-

selir, sonra tekrar düşer (önce özgün elektrik potansiyelinin biraz altına inip ardından özgün voltajına, yani ani artış öncesinde sahip olduğu voltaja geri döner).

Eylem potansiyelleri, nöronun zarındaki çok çeşitli iyon kanallarının açılıp kapanması sonucunda ortaya çıkar. Önce, nöronun içine pozitif yüklü iyonların girmesine izin veren bir iyon kanalı açılır, sonra bu iyon kanalı kapanır ve pozitif yüklü iyonların girmesine izin veren başka bir iyon kanalı açılır. Zar yüzeyindeki voltaj, normalde sahip olduğu negatif değerini kısa süreliğine yitirip pozitif değere geçer, sonra nöronun içine girmiş olan pozitif iyonlar nörondan çıkarken tekrar negatif değer kazanır.

İyon kanallarının açılmasıyla iyonların önce nöronun içine girmesinin, sonra da çıkmasının nedeni, bu iki grup kanalın *farklı türden* iyonların geçişine izin vermesidir. Nöronun içine giren iyonlar sodyum iyonları, daha sonra nörondan çıkan iyonlarsa potasyum iyonlarıdır. Bu iyonların hangi yönde akacağı iki faktöre bağlıdır: nöronun içindeki konsantrasyonun dışındaki konsantrasyona göre ne olduğuna ve zar yüzeyindeki elektrik potansiyeline.

Bir iyon bir bölgede başka bir bölgeye oranla daha yoğun biçimde toplandığında, fırsat bulursa, yoğun olarak bulunduğu bölgeden az olduğu bölgeye doğru sızma eğilimindedir. Kahvenize süt koyduğunuzda, süt ile kahve fincanınızda önce farklı yerleri işgal edecektir. Süt topaklarındaki süt parçacıkları yoğundur, kahve parçacıkları onların etrafını sarmıştır. Ama karıştırdığınızda, süt parçacıklarıyla kahve parçacıkları eşit biçimde birbirine karışana kadar yayılır. Nöronun dışında sodyum yoğun biçimde bulunurken içinde potasyum yoğun biçimde bulunur. Bir nöronun dışındaki sodyum yoğunluğunun artması, sodyum iyon kanalları açıldığında sodyumun nöronun içine akmasına veya yayılmasına neden olur. Aynı şey potasyum için de geçerlidir; yoğun biçimde bulunduğu yerden, yani nöronun içinden, yoğun olmadığı yere, yani nöronun dışına akar.

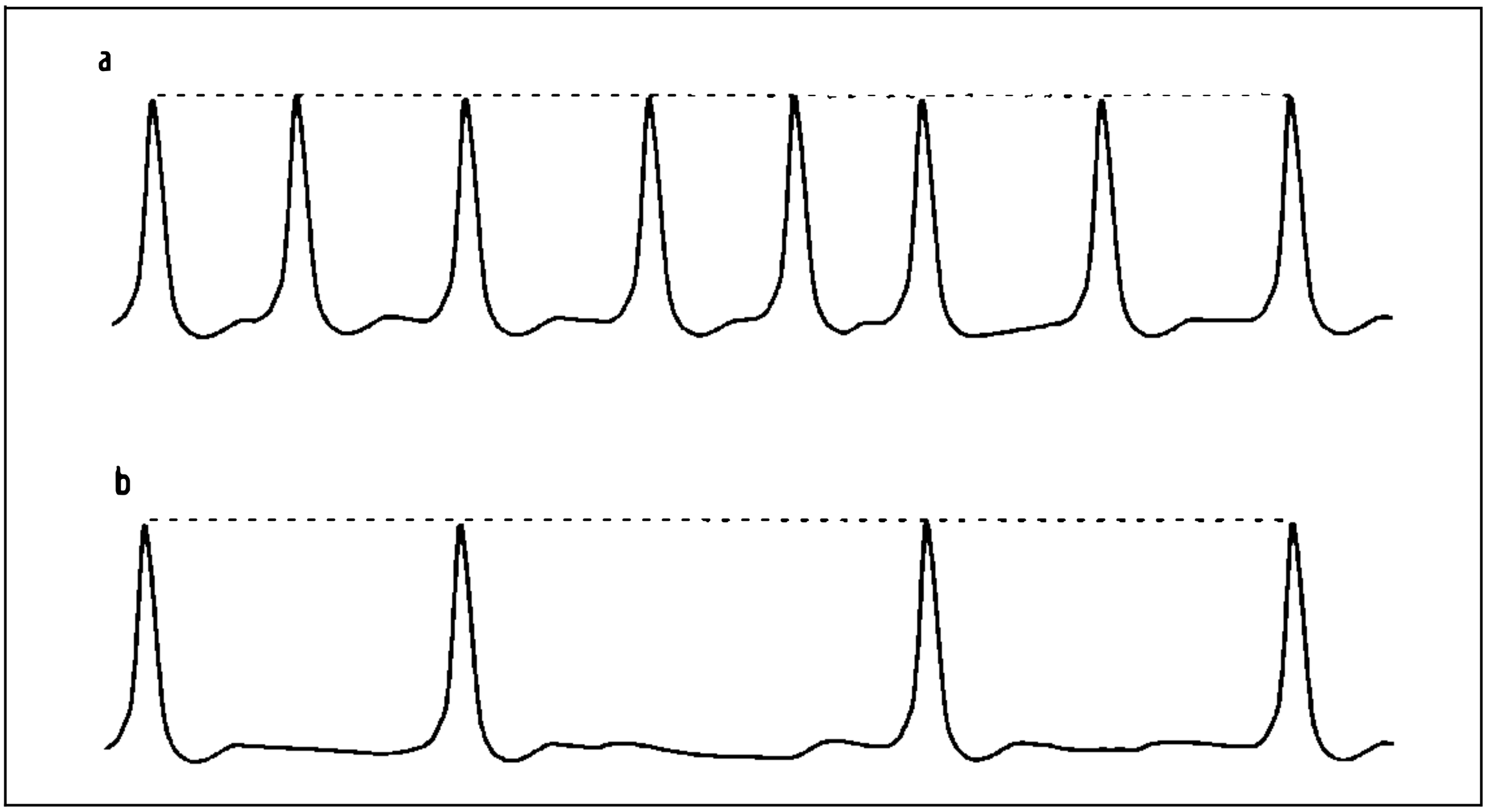
Süt ve kahveden farklı olarak sodyum ve potasyum iyonları aynı zamanda elektrik yüklüdür. Dolayısıyla, nasıl hareket edecekleri yalnızca yoğunluklarına bağlı değildir, nöronun elektrik potansiyeline de bağlıdır. Sodyum da potasyum da pozitif yüklüdür ve nöron içindeki negatif potansiyel onları çeker. Sodyumda bu elektriksel çekim,

konsantrasyon gradyanının etkilerini şiddetlendirerek sodyum iyonunun içeri doğru akışı için bir neden daha oluşturur. Potasyumda ise bu elektriksel çekim konsantrasyon gradyanını dengeler ve potasyumun nöronun dışına çıkma eğilimine karşı çalışır. Zar potansiyeli durgunluk durumuna yakın olduğunda bu iki etki yaklaşık olarak eşdeğerdir. Zar potansiyeli bundan daha az negatifse, nöron içinde daha fazla olan potasyum konsantrasyonu üstün gelir ve potasyum dışarı akar.

İyonlar nöronun içine veya dışına akarken hem elektrik gradyanlarının hem de konsantrasyon gradyanlarının değişmesine neden olur elbette. Konsantrasyon üzerindeki etki azdır ve bizim amaçlarımız açısından gözden çıkarılabilir, ama elektrik gradyanı üzerindeki etki büyüktür. Aslında bu değişiklikler bizatihi eylem potansiyelinin kendisini oluşturur. İlk sodyum girişi eylem potansiyelinin fazının artmasına, daha sonra gerçekleşen potasyum çıkışı da fazın tekrar ana değerine dönmesine neden olur.

Peki bu iyon kanallarının açılıp kapanmasına ne neden olur? Sodyum iyonlarının nöronun içine, potasyum iyonlarının nöronun dışına akmasına izin veren iyon kanallarının işleyişi aslında elektrik *denetiminde* gerçekleşir. Bir şey voltajın "yükselmesine", yani pozitif yöne kaymasına neden olduğunda, elektrik voltajındaki bu değişiklik sodyum kanalının şeklini değişikliğe uğratarak kanalın açılmasına neden olur. Bunun sonucunda nöronun içine sodyum akışı gerçekleşerek bir pozitif geribesleme döngüsünü harekete geçirir: Nöron içine daha fazla sodyum akışı olur, bu durum iç voltajın daha da pozitif olmasına yol açar, daha fazla kanal açılır ve içeriye daha fazla sodyum girişi olur.

Çok geçmeden, potasyum kanalları tetiklenir ve bu pozitif geribesleme döngüsüne müdahale eder. Zar potansiyeli daha da pozitif hale gelirken ikinci kapı, yani potasyum kanalı da şekil değiştirir ve açılır. Kanal açıldıktan sonra potasyum aradan serbestçe geçer ve nöronun dışına akar. Bu sodyum akışını dengeler ve zar potansiyelinin özgün seviyesine çekilmesini sağlar. (Aslında sodyum akışı durur çünkü voltaj yüksek oranda pozitif olunca sodyum kanalları kapalı konumda sıkışır kalır ve tekrar negatif voltaj seviyesine ulaşılana kadar açılmaz.)



Şekil 3.5 Bütün eylem potansiyelleri Tolstoy'un mutlu aileleri gibi (az veya çok) birbirine benzer. Tepelerin şekli, büyüklüğü, süresi ve yüksekliği yaklaşık aynıdır. Farklı olan, belli bir zaman dilimindeki sayılarıdır. Yani, bir kas iğciği veya Golgi tendon organ nöronu güçlü biçimde çekildiğinde (*a*)'daki gibi bir eylem potansiyeli dizisi oluşurken, zayıf biçimde çekildiğinde (*b*)'deki gibi bir dizi oluşur.

Kendi kendilerini üreten ve kendi kendilerine eski hallerine dönen bu eylem potansiyelleri, bir şeyler nöronu elektriksel açıdan daha pozitif bir alana sürüklediğinde de tetiklenir. Gerilmeye hassas Golgi tendon organlarıyla kas iğciği reseptörlerinde eylem potansiyelini ilk tetikleyen şey, kasların veya tendonların reseptör nöronu çekerek ve nöronun bazı (muhtemelen sodyum) iyon kanallarını açarak neden olduğu voltaj sıçramasıdır. Bu tür mekanik kuvvetlerin başlattığı bu küçük elektriksel değişiklik, daha sonra voltaja hassas sodyum ve potasyum kanallarının neden olduğu zincirleme tepkimeyle daha da artarak eylem potansiyellerinin oluşumunu sağlar.

Eylem potansiyelleri otomatik gelişen bir dizi olaydan kaynaklandığı için hepsi birbirine benzer (Şekil 3.5). Yaklaşık aynı büyüklüktedirler, aynı şekle ve zaman aralığına sahiptirler.[2] Dolayısıyla tek bir eylem potansiyelinden gerilme konusunda pek bir şey öğrenilemez. Güçlü bir gerilme eylem potansiyelini daha da büyütmez. Ama güçlü gerilmeler *daha fazla*, zayıf gerilmeler ise daha az eylem potansiyeli oluşmasına yol açar. Gerilme miktarı, eylem potansiyellerinin sayısıyla kendini belli eder, boyutuyla değil. Bu nedenle bey-

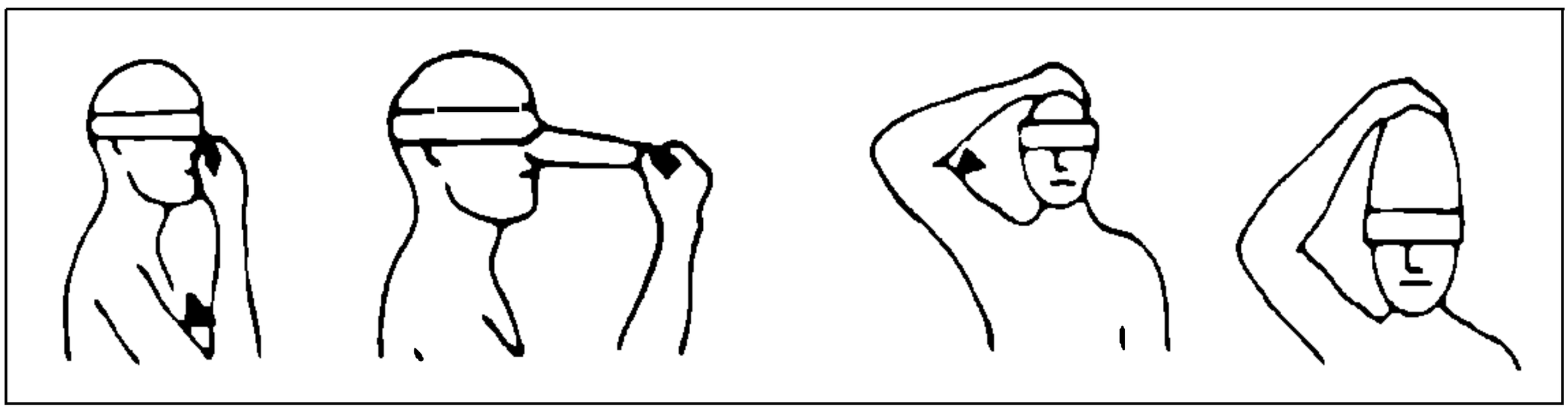
niniz, kaç sensör nöronunun gerildiğini belirlemek için eylem potansiyellerinin *oluşup oluşmadığını* ve *ne sıklıkla* oluştuğunu kontrol eder.

Negatif sayılar burada devreye girer. Nöral ateşleme örüntüleri sıfırdan düşük değerde eylem potansiyeli içermez. Bu örüntüler sıfırdan saniyede yaklaşık beş yüz tepeye kadar (tepeler arasında 2 ms'lik bir aralık olduğu anlamına gelir bu) çeşitlilik gösterir. Birbirine yakın ve birlikte hareket ederler; bir sonraki tepeye kadar iyon kanallarının açılıp tekrar kapanması için yeterli zaman yoktur. Ama negatif "ateşleme oranı" diye bir şey söz konusu değildir.

Beyin bu sorunu birkaç yolla halledebilir. Bunlardan biri, mevcut dinamik nöral ateşleme oranını muhtemel gerilme oranına uygun hale getirmektir. Az sayıda tepe gerilme olmadığına, çok sayıda tepe güçlü bir gerilme olduğuna işaret eder. Ve gerçekten de, kas iğciği reseptörlerine uygulanan gerilimi gitarın telleri geren kulakları gibi ayarlayan küçük kas lifleri vardır.

Bir başka yol da sistemi halat çekme oyunu gibi düzenlemektir. Kol bir tarafa doğru hareket ettiğinde gerilen reseptörler ile kol başka bir tarafa doğru hareket ettiğinde gerilen başka reseptörlerin varlığı sayesinde beyin, belli bir anda ve belli bir konumda bazıları yüksek aktivite seviyesine, bazıları düşük aktivite seviyesine sahip olacak olan çok çeşitli reseptörlerden gelen sinyalleri kıyaslayabilecektir. Bisepsleriniz her kasıldığında trisepsleriniz gerilir (ve tam tersi). Dolayısıyla daima ortalığı kolaçan eden, sıfırın üstündeki uygun bir ateşleme oranını başlatan birileri vardır. Hangi tarafın daha şiddetli ateşlediğini kıyaslamak vücudun konumu hakkında bilgi verir. Bu kıyaslama, aksi takdirde hem pozitif hem de negatif olabilen sayılarla uğraşma becerisi gerektirecek bir işin nispeten kolayca halledilmesini sağlar.

Yine de bu reseptörler kandırılabilir; beyniniz aslında olmayan bir şeyin olduğuna inandırıldığı yanılsamalara maruz kalabilir. Görme konusunun işlendiği 2. Bölüm'de de gördüğümüz gibi, bir sahne her iki göze farklı açılardan gösterilerek beyin aldatılabilir, aslında var olmayan bir derinliği algılaması sağlanabilir. Bir kas iğciği reseptörünü de başka bir numarayla kandırmak mümkündür. Örneğin fizik tedavide kullanılan vibratörlerle bir kasın iğcik reseptörlerinin



Şekil 3.6 Biseps kaslarınızın titreştirilmesi, dirseğinizin kıvrıldığı hissine neden olabilir. Vücudunuzun bir bölümüne, örneğin burnunuza veya başınızın tepesine dokunduğunuzda, burnunuz veya başınızın tepesi elinizle temasını sürdürmek için şişiyormuş gibi hissedersiniz.

o kas geriliyormuş gibi hareket etmesi sağlanabilir. Vibratörün neden olduğu titreşim, iğcik reseptörlerinin eylem potansiyellerini ateşlemesine yol açar. Beyniniz bu sinyali, hareket etmediği halde uzvunuz hareket ediyormuş gibi yorumlar.

Vibratörü biseps kaslarınıza (üst kolunuzun üst kısmına) uyguladığınızda, titreşim dirseğinizin gerildiği, trisepslerinizin (kolunuzun diğer tarafındaki kaslar) kasıldığı duygusunu yaratır. Bu başka tuhaf sonuçlara da yol açabilir. Biseps kaslarınıza titreşim uygulandığı sırada parmağınızın ucuyla burnunuza dokunmaya çalıştığınızı düşünelim. Dirseğin ileriye uzatıldığı yanılsaması, parmağınızı yüzünüzden uzaklaştırıyormuş gibi hissetmenize neden olacaktır (Şekil 3.6). Ama parmak ucunuzun ve burnunuzun derisi içindeki nöronlar baskı uygulandığı, yani parmağınızın hâlâ burnunuzla temas halinde olduğu sinyalini göndermeye devam edecektir. Nasıl olabilir bu? Olamaz elbette, Pinokyo olup da yalan söylemediğiniz sürece! Ama beyninizin elinde rakip iki "olgu" vardır ve bu olguları uzlaştırmasının tek yolu, vücut şeklinde bir tahrifat olduğunu tahayyül etmektir.[3]

Bu yanılsamalar en iyi karanlıkta, kas gerilmesine işaret eden hatalı duygunun görme aracılığıyla düzeltilemediği karanlık bir ortamda iş görür. Normalde gözleriniz vücut konumunuzla ilgili algınızı bir kez daha kontrolden geçirmenize yardımcı olur. Aynı şekilde, görsel konuma müdahale edilerek başka türden bir vücut konumu yanılsaması yaratılabilir. 2. Bölüm'de geçen George Stratton'ın

prizma gözlüğü deneyini hatırlayın: Ters görüş nedeniyle Stratton kendini sakar ve tuhaf hissetmişti; vücut konumu algısının değişmesinin bir belirtisidir bu.

Görsel sahnenin konumunu bozmayan ama sahneyi biraz yana kaydıran merceklerle Stratton'ın deneyinin daha incelikli bir versiyonu gerçekleştirilebilir. Bu etki, geleneksel merceklerin yerine prizmalar konan gözlüklerle sağlanabilir. Bu prizma mercekler, ışığı gözlerinize ulaşmadan kırarak nesnelerin görsel sahnede vücudunuza göre bulundukları yerleri değiştirir. Işığı, diyelim on derece sola kaydıran bir prizma gözlüğü taktığınızda görsel sahne size o kadar da farklı gelmeyecektir. İmgeler aynıdır, yalnızca bir tarafa kaymıştır. Ama nesnelerin göründüğü yerler ile onlara dokunmak veya onlardan sakınmak için yapmanız gereken *hareketler* arasındaki ilişki artık değişmiştir. Bu uyumsuzluk tökezlemenize ve sağa sola çarpmanıza neden olacaktır.

Stratton'da olduğu gibi, vücudunuz kısa bir süre sonra bu değişmiş görme deneyimine uyum sağlayacaktır, ama uzuvlarınızın her biri alışana kadar uyumsuzluk devam edecektir. Dart oynarken ilk atışlarınız karavana olacak, oklarınız hedefin on derece soluna düşecektir. Atışlarınıza devam ettikçe, on-on beş atıştan sonra oklarınız aşağı yukarı hedefine ulaşmaya (en azından normal atışlarınız kadar düzgün olmaya) başlayacaktır. Atışlarınız düzeldiğinde, el değiştirip tekrar atış yapmaya çalışırsanız, iki elinizi de aynı rahatlıkta kullanıyor olsanız bile atışlarınız tekrar yaklaşık on derece sola kayacaktır. O elinizi de alıştırmanız gerekecektir. Beyniniz, genelleme ihtiyacı kendini hissettirene kadar genelleme yapma konusunda ihtiyatlı davranıyor gibidir.

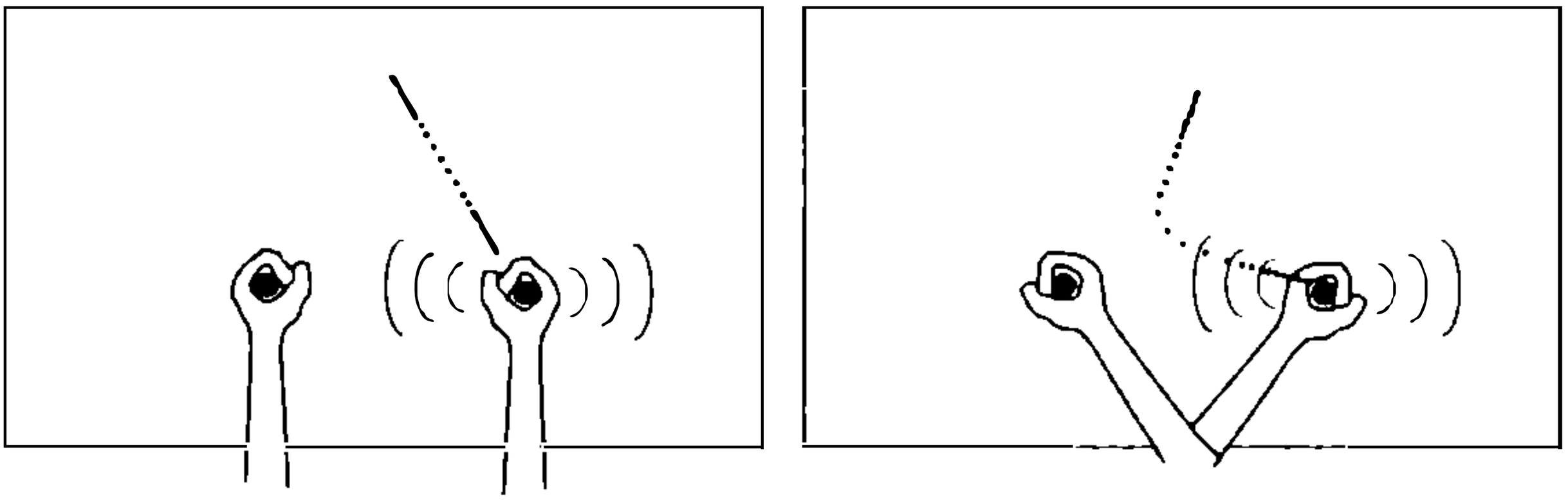
Bu örnekler, görsel konum algısı ile vücut konumu algısının ortak hareket ettiğini göstermektedir. Bu ortaklık bebeklikte, gözlerin dünyası ile vücudun dünyası arasındaki ilişkiyi öğrenmeye başladığımız dönemlerde başlar. Vücudumuz ile gördüğümüz veya dokunduğumuz şeyler arasındaki ilişkiyi öğrenmiş olarak dünyaya gelmeyiz. Bebekler bu ilişkiyi her uzuvları için ayrı ayrı öğrenirler. Bu sürece birçok zedelenme ve kahvaltıda saçılıp dökülen tahıl gevrekleri eşlik eder; ayrıca şaşırtıcı derecede uzun bir zamana yayılan bol miktarda alıştırma gereklidir: Katı yiyecekleri ağızda çevirirken dili

nasıl hareket ettireceğini öğrenmek aylar; yürümeyi öğrenmek yaklaşık bir yıl; koşmayı, zıplamayı, bir topu atıp tutmayı veya bir bardak buzlu çay koymayı öğrenmekse yıllar alır.

VÜCUDUNUZUN mekân algısının son aşaması, nesneleri teninizle hissetmektir.* Bu algıda, titreşimden güçlü baskıya ve hafifçe okşamaya kadar çeşitli dokunma uyaranlarına karşı uzmanlaşmış farklı sensör türleri rol oynar. Hissetmeniz için nesnelerin teninize doğrudan dokunmasına bile gerek yoktur. Bir tükenmezkalem alıp gövdesini tüylerinizi yalayacak şekilde ön kolunuzda gezdirin, onu çok rahat bir şekilde hissedeceksiniz. Vücudumuzdaki tüyler dokunma duyumuzun bir parçasını oluşturur. Bu anlamda, kediler, kemirgenler ve bıyıklarıyla nesneleri keşfeden diğer hayvan türleri gibiyizdir biraz. Biz de aynı şeyi kıl folikülü reseptörlerimizle yaparız, ama bizim tüy ve kıllarımız daha yumuşaktır ve bıyıkları olan hayvanlar gibi çevremizi araştırmak için onları hareket ettirme kabiliyetine de sahip değilizdir.

Göz ve görsel imge konusunda anlattıklarımızdan tahmin edebileceğiniz üzere, deri ve kıl folikülü reseptörleri ancak dokunma, baskı veya titreşim onlara ulaştığında tepki verir. Reseptörlerin tepki vermeleri için bu mekanik kuvvetlerin reseptörlerin elektrik sinyallerinin değişmesine neden olmaları gerekir. Dokunmanın sınırlı bir mesafede bir reseptörün zarına etki etmesi, bu nöronların beyne bir uyaranın konumu hakkında bilgi verebileceği anlamına gelir. Bu nöronların deri üzerinde *alıcı alanları* vardır. Bir şey derinizde belli bir reseptörün alıcı alanında olan bir yere dokunduğunda, o reseptör tepki verir; dokunmazsa tepki vermez. Beyniniz hangi reseptörlerin tepki verdiğini kontrol eder ve buradan bu uyaranın vücut yüzeyinde nerede bulunduğunu öğrenir. Ondan sonra bu dokunma sinyallerini, vücudun konumuyla ilgili bilgilerle birleştirerek dokunulan nesnenin mekân içinde nerede olduğunu tahmin eder.

* Sinirbilimciler dokunma duyusunu, vücut konumu algısını ve vücuttaki reseptörlerden toplanan diğer bilgi türlerini somatosensori (Yunanca "vücut" anlamına gelen *soma* sözcüğünden türetilmiştir) sistemi başlığı altında toplarlar.



Şekil 3.7 Elinizde bir şey hissettiğinizde (titreşen bir çubuk gibi), hissettiğiniz şeye bakmak için gözlerinizi hareket ettirirsiniz. Bu göz hareketi genellikle son derece düzdür: Gözlerin belli bir anda baktığı yeri tasvir eden noktalar, başlangıç noktasından bitiş noktasına kadar düz bir çizgi oluşturur. Ama vücudunuz olağandışı bir konumdaysa, örneğin elleriniz çaprazsa, beyniniz ilk anda nereye bakacağını şaşırır ve gözleriniz yanlış yöne hareket eder, sonra doğru yöne yönelir.

Bir keresinde, bu sürecin nasıl gerçekleştiğini test eden bir deney yapmıştım.[4] Denek olarak lisansüstü danışmanımla birlikte bir masanın başına oturduk ve masaya monte edilmiş iki küçük çubuğu ellerimizle kavradık. İki çubuk da titreşebiliyordu, hangi çubuk titreşirse ona bakacaktık; yani gözlerimizi başka bir görsel hedeften ayırıp titreşen çubuğa çevirecektik (Şekil 3.7). Deneyi, ellerimizi görmeyelim diye, karanlıkta gerçekleştirdik; göz hareketinin dokunma temelinde gerçekleştirilmesi gerekiyordu. Çubukları kollarımız birbirine paralel olacak şekilde kavradığımızda (sağ el sağ çubuğu, sol el sol çubuğu kavradığında) hiç zorluk çekmedik. Ama çubukları kollarımız çapraz şekildeyken kavradığımızda, yani sol elimiz sağ çubuğu, sağ elimiz sol çubuğu kavradığında, tuhaf şeyler oldu. Bu düzenlemede, doğru ele bakmaya çalıştığımızda kafamız karıştı. Başlarda, sol elin kavradığı çubuk titreştiğinde, titreşen çubuk soldaymış gibi geldi bize. Kısa süren bir şaşkınlığın ardından, algı mekânın sağ tarafına, yani doğru tarafa kaydı. Dokunma duyusunu başlangıçta uzaydaki yanlış konuma atfetmiştik. Ellerimizin çapraz olduğunu ve *sol elin sağ taraf* anlamına geldiğini anlamamız biraz zaman almıştı.

Verilere bakınca bu kafa karışıklığının kanıtlarını görebildik. Göz konumlarımızı göz hareketlerini izlemeye yönelik bir sistemle ölçmüş ve bu sistemden gelen bilgileri, daha sonra analiz etmek üze-

re bilgisayarda depolamıştık. Göz konumlarımızı her 2 milisaniyede bir ölçmüştük; bu sayede, gözlerimiz çok hızlı hareket ediyor olsa bile, gözlerimizin konumlarını, göz hareketlerimiz henüz devam ederken ölçebilmiştik. Gözlerimizin sık sık eğri bir yol izlediğini bulguladık; önce yanlış yöne çevriliyor, yanlış tarafa bakıyor, hareketin ortasında yanlış yolda olduğunu anlayıp doğru yöne çevriliyordu.

Bu durum özellikle şaşırtıcıydı, çünkü *sekme* adıyla bilinen bu göz hareketi neredeyse her zaman düz biçimde gerçekleşmekteydi. Sekmenin İngilizce karşılığı olan *saccade* kelimesi, Fransızcada "ani hareket" demek olan bir sözcükten gelir; gözlerinizi ani hareketlerle sahnenin başka noktalarına çevirirsiniz. Beyin normalde, gözü yeni konumuna geçerken mümkün olduğunca düz bir yol izlemesini sağlayacak şekilde programlar. İsteseniz de kavisli bir sekme gerçekleştiremezsiniz. (Bunu yapmayı denediğinizde genelde iki ayrı sekme gerçekleştirirsiniz.) Dolayısıyla, deneyde gözlediğimiz kavisli hareket, beyinlerimizin gözlerimizi göndereceği yer konusunda fikir değiştirdiğine ve bu fikir değişikliğini hareketin ortasında gerçekleştirdiğine işaret etmekteydi. Gözlerimiz bir noktaya doğru harekete geçmiş, zihnimizin hedefle ilgili tahminleri değişince de yön değiştirmişti. Nitekim titreşen çubuğa bakmadan önce biraz beklediğimizde, göz hareketlerimiz yeniden düzelmişti.

Bu olay özelinde, vücut konumu algımızın gerçeği kavraması belli bir zaman alsa da, normalde biz harekete geçtikten hemen sonrası bu algının en hatasız olduğu zamandır ve biz hareketsiz durdukça hata yapma olasılığı artar. Bir dahaki sefere bir şekerlemeden uyandığınızda, hareket etmeden önce nerede olduğunuzu düşünmeye çalışın. Dizinizin hangi açıda kıvrıldığını veya kolunuzun başınızın ne kadar üzerinde durduğunu anlamakta zorlanabilirsiniz. Ama hareket etmeye başlar başlamaz bu belirsizlik yok olacaktır.

Bu belirsizliğin nedeni, vücut konumunu algılayan reseptörlerin tepki şiddetlerinin konum değişikliklerinde en üst seviyede olmasıdır; faaliyet seviyeleri zaman geçtikçe azalır. Bu yalnızca konum algınız için değil, dokunma duyunuz için de geçerlidir. Çoraplarınızı düşünün mesela. Şu anda ayaklarınızda çorap var mı? Olup olmadığını nereden biliyorsunuz? Çünkü onları hissetmediğinize adım gibi

eminim. Giysileriniz dokunma duyunuzdan kaybolma eğilimindedir ama sivrisinek ısırması gibi her yeni uyaranda, dokunma duyunuz buna hemen ve kuvvetle tepki verir.

Duyu organları tarafından ne kadar çeşitli duyu bilgisinin (görme, dokunma ve vücut konumu) algılandığı ve bu organların ne tür mekânsal bilgiler sağlayabileceği konusunda bir şeyler öğrendiğinize göre, artık beynin içine girmeye ve bu bilginin nasıl "temsil edildiği" hakkında daha fazla şey öğrenmeye hazırsınız demektir. Bu duyu bilgisi için nöral sinyaller nasıl bir kod işlevi görür? Gerek duyma gerekse seslerin nereden geldiğini nasıl bildiğimiz konusunda henüz bir şey söylemediğimizi fark etmişsinizdir. Bu konuya sonra geleceğiz.

4

Beyin Haritaları ve Benekler

BURAYA KADAR gözleriniz, deriniz, kaslarınız ve eklemlerinizdeki duyu reseptörü nöronlarının bir olayı veya durumu (ışığı, vücut konumunuzu, teninize dokunan bir şeyi) elektrik sinyaline nasıl dönüştürdüğünü anlattım. Beyninizdeki sensörler, ışığı retina yüzeyi boyunca aldığı milyonlarca konumu değerlendirerek ölçer veya kollarınızdaki, bacaklarınızdaki, parmaklarınızdaki ve ayaklarınızdaki baskıyı, bu uzuvlarınızdaki sayısız bölgeyi tarayarak algılar. Ama bunlar mekân algısı oluşturmada atılan ilk adımlardır sadece. Her iyi analistin yapacağı gibi beyin, işlenmemiş bilgilerden oluşan bu nöral hesap tablosunu dikkatle değerlendirerek görsel ve dokunsal dünyanın durumu ve vücudun bu dünya içindeki konumuyla ilgili sonuçlar çıkarır. Bu da öyle sanıldığı gibi dolaysız gerçekleşmez.

Nesnelerin sınırlarını algılama yeteneğinizi ele alalım mesela. Bir kahve kupasını elinize aldığınızda, kulbu, ağzı ve gövdesi tek parça halindedir. Beyninizin bir nesnenin nerede bitip başka bir nesnenin nerede başladığını belirleyen dikkatli analizi sonucunda, kupayı kaldırdığınızda kupanın diğer bölümlerinin de onunla birlikte gelmesine şaşırmazsınız. Bu senaryoyu, üzerinde aynı sahnenin resminin yer aldığı bir yapbozla karşılaştıralım. Yapboz parçalarının sınırları, resimdeki nesnelerin sınırlarıyla uyuşmaz; üzerinde kahve kupası resmi yer alan bir parçayı elinize alırken, masa resminin bir parçası da onunla birlikte gelir. Bu da beyninizi şaşırtmaz (gerçi bu

konuda tamamen güvenilir de değildir). Peki nasıl olur da beyniniz (genellikle) aradaki farkı anlar? Sahneyi bu şekilde çözümlemek için hangi yöntemleri veya algoritmaları kullanır?

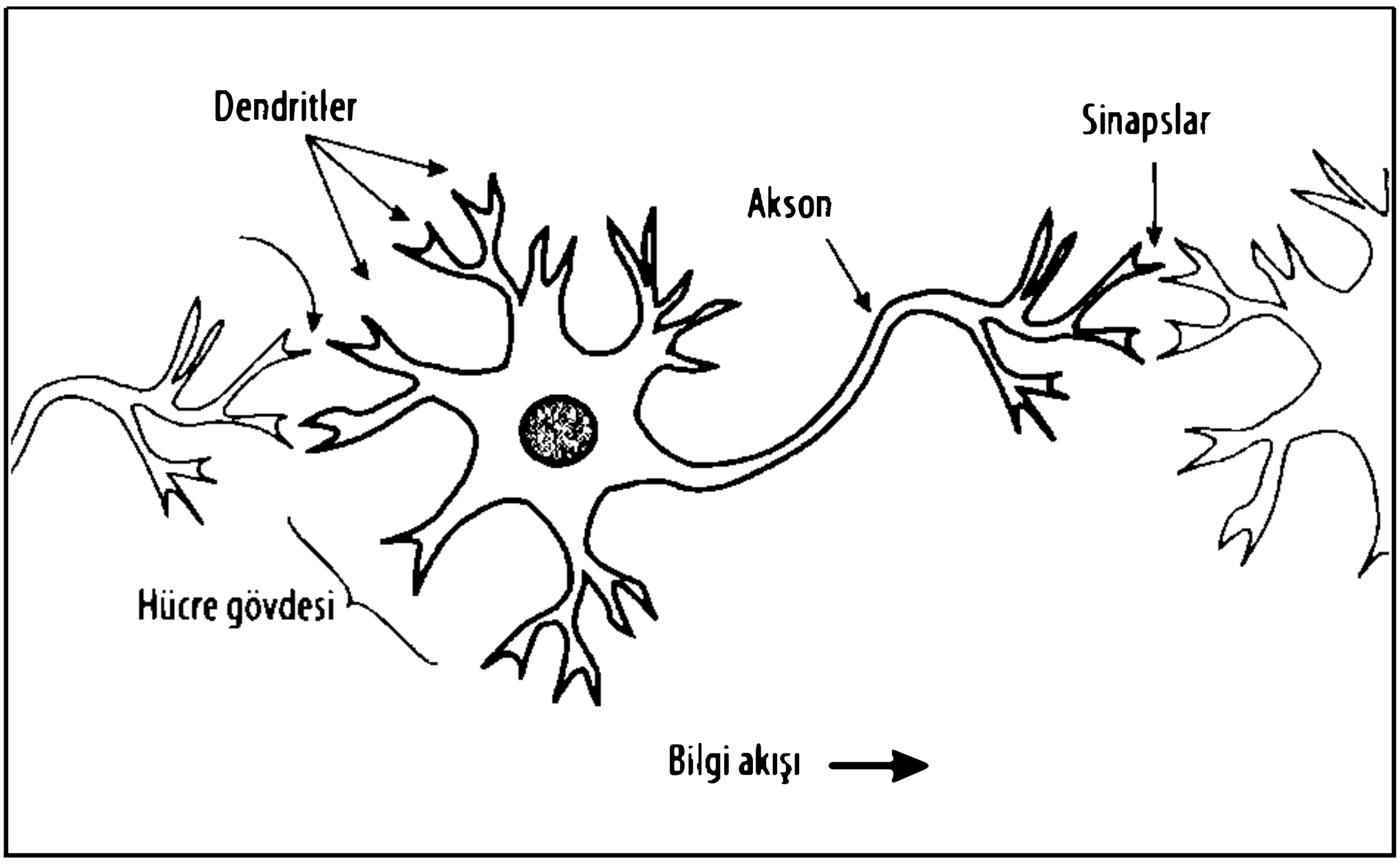
Bu tür verileri düzene sokmanın önemli yöntemlerinden biri *beyin haritasıdır*. İleride göreceğimiz gibi, beyin *dünya veya vücut içindeki* mekândan gelen bilgileri temsil etmek için *beyin içindeki* mekândan yararlanır. Görsel dünyadaki mekân veya teninizin yüzeyi, beyindeki fiziksel faaliyet alanı içinde temsil edilir. Bu sistem, beynin bir varlığı diğer varlıktan ayıran kenar ve sınırları tespit etmek gibi temel görevleri yerine getirmesine veya bir şeyin hareketsiz mi yoksa hareket halinde mi olduğu gibi daha gelişmiş değerlendirmelerde bulunmasına yardımcı olur. Bu haritalar hata yaptığında ortaya çıkan şaşırtıcı durumlara (beynimizin kayıp verinin yerine ikame ettiği ve olmayan şeyleri görmemize veya hissetmemize neden olan yanılsamalara) da değineceğiz.

Araştırmamız nöronların hesaplama araçlarıyla başlayacak: Nöronların diğer nöronlarla nasıl "konuştuklarını" ve neler söylediklerini göreceğiz.

BİLGİSAYARLARDAKİ transistörler gibi nöronlar da yapı itibariyle birbirlerine benzer. Ama her ne kadar ortak temel özellikler taşıyor olsalar da, diğer nöronlarla kurdukları bağlantıların örüntüsü açısından her nöron kendine özgüdür ve diğerlerinden farklıdır. Bir nöronun aldığı sinyaller ve bu bilgileri nereye göndereceği, o nörona ve ilişkili olduğu nöron grubuna bağlıdır.

Nöronlar teller ile küçük işlemcilerin bir bileşimidir (Şekil 4.1). Alıcı tarafındaki tellere *dendrit* adı verilir, nöronlar başka nöronlardan gelen sinyalleri burada toplarlar. Her nöronun birçok dendriti olabilir, bu sayede başka nöronlarla da bağlantı kurabilirler. Gönderici tarafında bulunan tellere *akson* adı verilir. Hücre gövdesinden yalnızca bir akson ayrılsa da, o akson dallanarak birçok alıcı nöronla bağlantı kurabilir. Aksonların enleri çıplak gözle görülemeyecek kadar incedir ama uzunlukları kol veya bacak uzunluğunda olabilir.

Dendritlerle akson(lar) arasında *hücre gövdesi* yer alır. Hücre gövdesi, girdi sinyalleri için takas odası işlevi görür. Burada dendritlerden gelen bütün elektrik sinyalleri toplanır ve aksondan nasıl



Şekil 4.1 Bir nöron çizimi. Elektrik sinyalleri dendritlerden hücre gövdesine aktarılır, oradan aksonlar üzerinden dışarıya taşınır. Bir nöronun aksonları, nöral yol üzerindeki sonraki nöronların dendritleriyle sinapslar oluşturur.

bir çıktı sinyali gönderileceğine "karar" verilir. Yani farklı dendritlerden gelen bütün elektrik sinyalleri toplanır ve bu sinyaller sonunda akson ve onun dallarından gönderilecek olan tek bir mesaja dönüştürülür.

Çıktı sinyali, 3. Bölüm'de sözünü ettiğim elektrik atımlarına ya da eylem potansiyellerine dönüştürülür. Çıktı sinyali, belli bir zaman aralığında birçok veya birkaç eylem potansiyelinden meydana gelebildiği gibi, hiçbir eylem potansiyeli barındırmayabilir. Kas iğciği ve Golgi tendon organı reseptörleri konusunu incelerken gördüğümüz üzere, her eylem potansiyeli yaklaşık olarak aynı büyüklüktedir. Yani bilgiyi taşıyan eylem potansiyellerinin sayısıdır; daha açık bir ifadeyle, eylem potansiyellerinin sıklığı ve zamanlamasıdır.

Bir nöronun eylem potansiyelleri diğer nöronları *sinapslar* aracılığıyla etkiler; sinapslar bir nöronun aksonu ile bir başkasının dendriti arasındaki bağlantıyı sağlar.* Aksonla dendrit birbirine tam olarak temas etmez, birbirlerine sinapslarda, aksondan salınan moleküller dendrit tarafından algılanabilecek mesafeye kadar yaklaşırlar.

* Sinapslar aynı zamanda aksonlar tarafından hücre gövdeleri veya başka aksonlar üzerinde de oluşturulabilir. Dendritler arasında da sinaps olur. Burada katı kurallar yoktur.

Nöronlar arasında mesaj taşıyan bu moleküllere *nörotransmitter* adı verilir. Nörotransmitterler aksondan uzaklaşıp karşı taraftaki molekülün dendritine sıçrarken, dendrit onları karşılamaya hazırdır. Dendritin zarı içinde bulunan ve *reseptör* adıyla bilinen küçük protein molekülleri, nörotransmitter moleküllerini bir beyzbol oyuncusunun topu yakalayışı gibi yakalar. Bu moleküller bağlandıktan sonra, alıcı nöronun iyon kanalları tetiklenir, açılıp kapanmaya başlayarak nöronun elektriksel zar potansiyelini değiştirirler.

Çocukların oynadığı kulaktan kulağa oyununda, kulağa fısıldanan sözcüğün yol boyunca değişmesi gibi, burada da nöronun ateşleme örüntüleri beynin görme yolu boyunca ilerlerken değişikliğe uğrar. Her nöron ve sinapsta, bu nöral aktivite örüntülerinin taşıdığı mesaj değişebilir. Ama kulaktan kulağa oyunundan farklı olarak buradaki değişiklikler son derece yararlı bir şeye hizmet eder: Görme sistemlerimizin nesnelerin konturlarını seçmesine yardımcı olurlar. Bunu yapmaya ise retinada başlarlar.

RETİNA, FOTORESEPTÖRLERDEN başlamak üzere çeşitli katmanlar halinde düzenlenmiş farklı nöron türlerini içinde barındırır. Işık fotoreseptörler tarafından elektrik sinyaline dönüştürüldükten sonra, bu sinyaller nörondan nörona (aksondan sinapsa, oradan dendrite, hücre gövdesine ve aksona) geçebilir ve bu geçiş retina zincirindeki son nöron grubuna kadar devam eder. Bu yol, nesnelerin sınırlarını belirleme işleminin başladığı yerdir. İlk adım, bir sınır türüne tek tip bir uyarandan daha iyi tepki veren bir nöron "yapmak"tır. Kenarlar bir nesneyi diğerinden ayıran şeylerdir. Dolayısıyla kenarları vurgulamak, bir nesnenin nerede bitip diğer nesnenin nerede başladığına dair bir ipucu sağlayabilir.

Peki ama bir kenarı vurgulamak *ne anlama* gelir ve bir nöron bunu yapmak için kendini nasıl donatır? Fotoreseptörler kendi başına kenarlara karşı hassas değildir; verdikleri tepkiler belli bir yerdeki –alıcı alandaki– ışığın miktarına bağlıdır. Ama nöron zincirinde yer alan sonraki bazı nöronlar, (hem pozitif hem negatif işleyişe sahip) farklı sinaps türleri aracılığıyla fotoreseptörlerden girdi alır. Bu durum, görsel sahnedeki *kontrast* alanları (bir kenarın temel bir unsurudur bu) araştıran nöronların oluşmasına neden olur.

Bir kol veya bacağın zıt taraflarında bulunan sensörler arasındaki halat çekme oyununda olduğu gibi, sinapslar hem pozitif hem negatif sinyallerin işlenmesini sağlar. Pozitif yani *uyarıcı* bir sinapsta, gelen sinyale karşılık olarak alıcı nöronun voltajı yükselir, yani negatiflik değeri azalır. Uyarıcı sinapslar alıcı nöronu bir eylem potansiyeli ateşlemeye daha hazır hale getirirler. Negatif yani *ketleyici* (inhibitör) bir sinapstaysa voltaj çok da fazla değişmeyebilir, çünkü voltajın negatiflik miktarının bir sınırı vardır, ama nöron diğer uyarıcı girdilere daha az tepki verecek hale gelir.* Bu da oluşturduğu eylem potansiyellerinin sayısının azalmasına neden olur.

Nörotransmitter reseptör moleküllerinin eylemi, bir sinapsın uyarıcı veya ketleyici olmasını belirler. Bir nörotransmitter, kontrol ettiği iyon kanalına ve o kanalı açmasına veya kapamasına bağlı olarak, her biri alıcı nöron üzerinde farklı etkilere neden olabilen farklı birçok reseptör molekülüyle etkileşime girebilir. Karmaşık bir durum!

Fotoreseptörler ile retinada yer alan diğer nöronlar arasındaki pozitif ve negatif sinapsların örüntüsü, farklı yerlerde ışığın seviyesindeki *farklılıklara* karşı hassasiyet yaratır. Bunun nasıl gerçekleştiğini birazdan anlatacağım.

Önce, 2. Bölüm'de kısaca değindiğimiz bir noktaya geri dönelim: Işık, fotoreseptörün elektrik sinyalini daha negatif hale getirir. Yani ışığın "ham" etkisinin ketleyici bir etki olduğunu düşünebiliriz; ama fotoreseptör sinyalini alıcı nöronlara aktarırken, bu aktarma işini ya uyarıcı sinapsla ya da ketleyici sinapsla yapar. Sonuçta pozitif bir sayıyla negatif bir sayının çarpımına benzer bir durum ortaya çıkar: Ya uyarıcı sinapslarla ilk sinyalin yönü korunur ya da ketleyici sinapslarla bu sinyal tersine çevrilir.

Bir nöronla (A) bir uyarıcı sinaps, başka bir nöronla da (B) bir ketleyici sinaps oluşturan bir fotoreseptör düşünelim. Karanlıkta bu fotoreseptörün zarı yaklaşık –40 mV ve bu voltajla her iki sinapsın-

* Bu durum iyonların tam –sadece potasyum ve sodyum değil negatif yüklü klorür iyonları da içeren– karışımından kaynaklanır. Daha önce de değindiğimiz gibi, bu iyonların birbiriyle nasıl karıştığı onların yoğunluk oranlarına ve elektrik yüklerine bağlıdır. Bunun sonucunda da, ketlendiğinde bile zar potansiyeli yaklaşık –70 mV'den daha negatif olmaz.

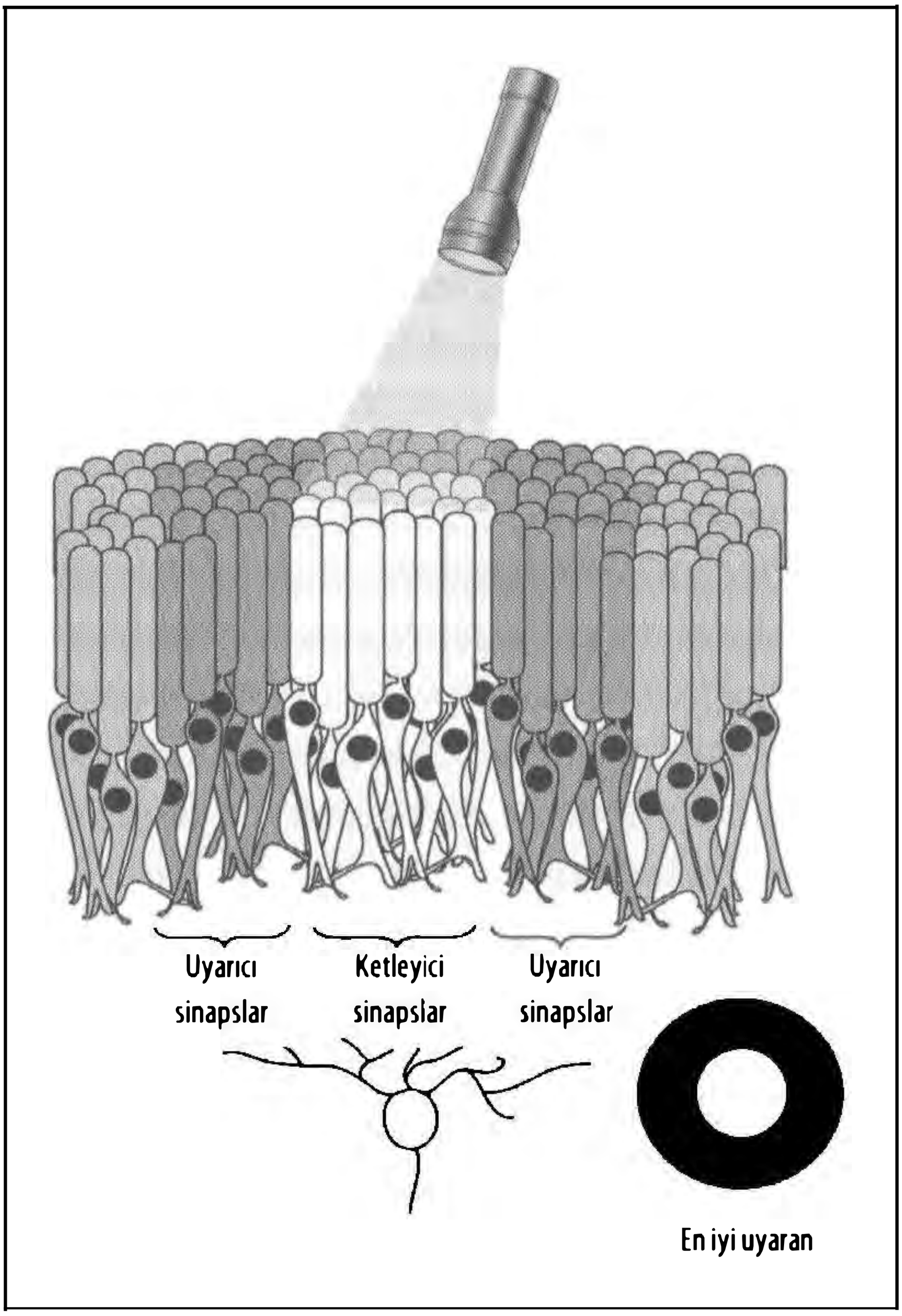
dan sabit nörotransmitter akışı gerçekleşiyor olsun. A nöronunun zar potansiyelinin de yaklaşık –40 mV olabileceği anlamına gelir bu. Ama B nöronu için bu daha negatif bir voltaj anlamına gelecektir: Bunun da –50 mV olduğunu düşünelim.

Şimdi de ışığın fotoreseptörün zar potansiyelini –40 mV'den –50 mV'ye değiştirdiğini (–10 mV'lik bir değişiklik) varsayalım. Uyarıcı girdi alan A nöronu da aynı şeyi yapacaktır, yani değeri –40 mV iken –50 mV olacaktır. Ama bir ketleyici sinapsla bu değişiklik tersine çevrilir. Dolayısıyla B nöronunun zar potansiyeli aksi yönde değişecektir, yani –50 mV iken –40 mV olacaktır. Buradan, bir fotoreseptörden uyarıcı sinaps alan bir nöronun ışık tarafından *ketleneceğini*, ketleyici sinaps alan bir nöronun da ışık tarafından *uyarılacağını* söyleyebiliriz.

Buraya kadar, alıcı nöronun yalnızca bir fotoreseptörden girdi aldığı bir durumu tarif ettim. Girdiyi aldıktan sonra nöron, ona bilgiyi veren fotoreseptörün büyüklüğünde ve aynı lokasyonda bir alıcı alana sahip olacaktır. Sinapsın ne tür bir sinaps olacağı, ışığın etkisinin işaretine (artı veya eksi oluşuna) bağlıdır.

Şimdi, nöronun ilk fotoreseptörün etrafındaki komşu nöronlardan da sinapslar aldığını farz edelim. Alıcı nöronumuzun alıcı alanı daha büyük, daha karmaşık olacaktır; alıcı alanı, bağlandığı fotoreseptör halkasındaki fotoreseptörlerin alıcı alanlarının birleşiminden oluşacaktır. Son ve en önemli özellik: Bu fotoreseptör halkasındaki sinapsların zıt işaretli olduğunu düşünelim. Merkezdeki fotoreseptörün sinapsı ketleyici ise, halkadakilerin sinapsları uyarıcı olacaktır.

Bunun gibi bir düzenlemenin nihai sonucu, koyu renk bir zemindeki açık renk bir noktaya en fazla tepki üreten bir alıcı nöron olacaktır (Şekil 4.2). Eğer açık renk nokta, merkezdeki fotoreseptörün alıcı alanıyla uyuşacak doğru büyüklük ve konuma sahipse ve koyu renk zemin halka üzerindeki fotoreseptörlerin alıcı alanlarını kaplıyorsa, o zaman bu iki girdi kaynağının her biri alıcı nöron üzerinde mümkün olan en pozitif (veya en az negatif) etkiye neden olur. Çevredeki fotoreseptörler koyu uyarana karşılık pozitif bir sinyal oluşturur ve bu uyarılma bir uyarıcı sinaps aracılığıyla alıcı nörona taşınır. Fotoreseptörlerin orta bölgesi açık renk nokta tarafından ketlenir, bu da alıcı nöronu, bu ortadaki alanın koyu renk bir uyaran ta-



Şekil 4.2 Görsel nöronların görsel sahnedeki ışık farklılıklarına hassasiyetlerini nasıl kazandıklarını gösteren çizim. Fotoreseptörlerle açılan nöral yolda hem uyarıcı hem de ketleyici sinapslar vardır. Işığın kendisinin fotoreseptörler üzerinde ketleyici bir etkiye sahip olduğunu hatırlayın. Aşağıda yer alan görsel nöronlar, iki grup fotoreseptörden eşmerkezli uyarıcı ve ketleyici örüntüleri alır. Örneğin burada ortadaki fotoreseptörler ketleyici, çevredekiler ise uyarıcıdır. Bu girdi örüntüsünde alıcı nöron, koyu renk bir zemin üzerinde açık renk bir nokta olduğunda, yani ışık ortadaki fotoreseptörleri aydınlatıp çevredeki fotoreseptörleri karanlıkta bıraktığında en aktif haldedir. Bu uyaran, nöronun aldığı uyarıcılık miktarını azami dereceye çıkarıp ketleyiciliğini asgari dereceye düşürür. Diğer nöronlar ortadan uyarıcı sinapslar, çevreden ketleyici sinapslar alırlar ve en fazla tepkiyi, açık renk zemin üzerindeki koyu renk noktalara karşı verirler. Bunun sonucunda, görsel sahnenin komşu alanlarının farklı ışık miktarı aldığı bölünmlerine yapılan vurguların, nesnelerin sınırlarını tanımlama yolunda atılan ilk adım olduğu düşünülmektedir.

rafından uyarılması halinde oluşacak olan ketleyici sinyallerden uzak tutar. İşte size bir benek sensörü!

Diğer alıcı nöronlar zıt girdi örüntüsüne (ortada uyarıcı girdiler, çevrede ketleyici girdiler) sahiptirler, bunlar en güçlü tepkiyi açık renk zemin üzerindeki koyu renk beneklere gösterirler. Benekler farklı büyüklüklerde de olabilir; daha büyük beneklere hassasiyet daha büyük fotoreseptör gruplarından girdi alan nöronlarda olur. Bu tür bağlantı örüntüleri bir dizi tepki örüntüsü oluşturur, ama hepsi görsel imgenin ışık örüntülerinin *değişiklik gösterdiği* bölgelerini vurgulamaya yönelik çalışır.

Görsel imgede bölgesel değişimin vurgulanmasında, beneği algılamak, nesnenin bütününün sınırlarının belirlenmesi sürecinde çok küçük bir adımdır. Ne var ki, çeşitli sayıda ve çok farklı düzenlenmiş fotoreseptörlerden sinyal topladıktan sonra bile, retinanın alıcı nöronları yalnızca çok küçük, çoğunlukla da yuvarlak bölgelere karşı hassastır. Bu nedenle beyin karşıtlığa dayalı bu ilk bağlantılar örüntüsü üzerine eklemeler yapmak durumundadır. Birbirini izleyen her sinaps evresinde, görsel dünyanın daha geniş bölgesinden alınan sinyaller birleştirilir; bu sinyaller görsel sahnenin karşıtlık oluşturan bölümlerini yuvarlak örüntülerdekinden daha ilginç yollarla vurgular.

BEYNİN böyle karmaşık bağlantı örüntülerini "inşa ederken" karşılaştığı en önemli zorluklardan biri, bütün bu örüntülerin düzenini muhafaza etmektir. Bu zorluk özellikle bağlantıların arasındaki fiziksel mesafe (retina ile beyin arasındaki gibi) uzun olduğunda kendini hissettirir. Retinanın son katmanı (fotoreseptörlerden gelen mesajları alan en son katmanı) *retinal ganglion hücreleri* adıyla bilinen bir nöron grubundan oluşur. Retinal ganglion hücrelerinin retinada dendritleri ve hücre gövdeleri bulunur ama uzun ve lifsi aksonları, embriyonun gelişimi sırasında gözün arka kısmından beyne kadar uzanır. Hedefleri, görme yolu üzerindeki bir sonraki duraktır: retinanın birkaç santim arkasında, beynin ortasında yer alan *talamus.**

Bu mikroskobik aksonlar uzak mesafelere kadar "yolculuk" etseler de birbirlerine dolanmazlar. Retinada yan yana olan nöronlardan gelen aksonlar, talamusta yan yana olan nöronlarla bağlantı ku-

rar ve onlarla sinaps oluştururlar. Şaşırtıcı bir beceridir bu. Retinal ganglion hücrelerinin hücre gövdelerinin çapları yaklaşık bir milimetrenin yüzde biri büyüklüğündedir ama aksonları 70 mm'lik mesafelere uzanabilir, yani hücre gövdelerinin çaplarının yedi bin katı uzaklığa erişebilirler.[1] İki kapı komşusunun iki yüz kilometre uzaktaki bir şehre taşınması ve (hiç planlamadıkları halde) kendilerini yine komşu evlerde bulması gibi bir şeydir bu.

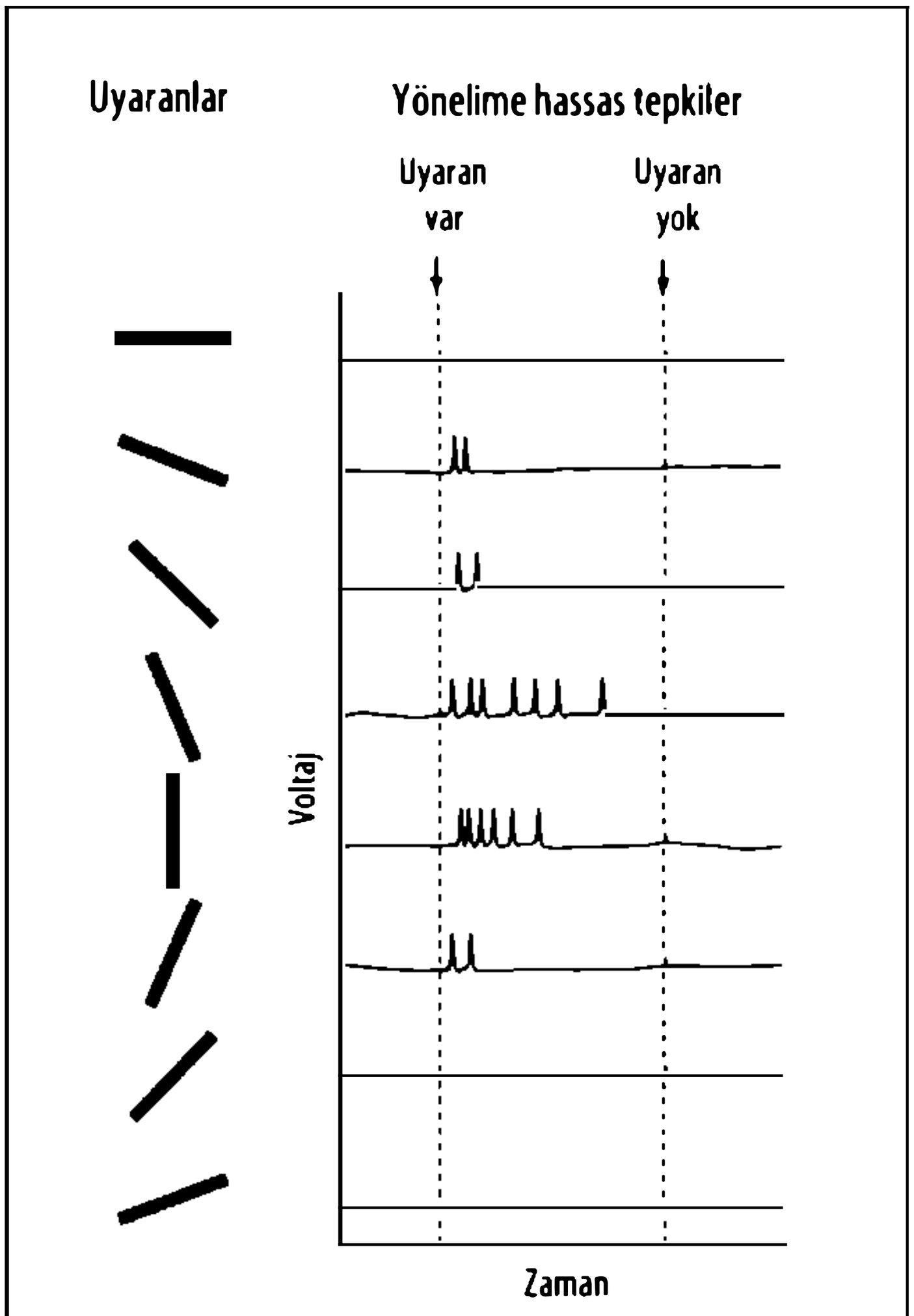
Bu aksonlar yolculuklarında birbirlerine dolanmadıkları için, gözbebeği ve merceğin retinada oluşturduğu görsel harita talamusta yeniden oluşturulur. Bu talamus nöronları, atalarının görüş açısını miras alır. Talamus nöronlarının ışık hassasiyetini ölçmek için talamusa elektrot bağladığınızda, bu nöronların ışığa belli bölgelerde tepki verdiğini görürsünüz. Onların da alıcı alanları vardır. Yine retinada olduğu gibi, elektrotu biraz kaydırıp da yakınlardaki nöronların ışık hassasiyetini ölçtüğünüzde, alıcı alanlarının ilk nöronların yakınında ama farklı bir yerde olduğunu görürsünüz. Elektrotu biraz daha kaydırdığınızda alıcı alanlar da ileri kayacaktır. Aynı şey, görsel işlemin talamustan sonraki evresini oluşturan ve talamustan düzenli biçimde bağlantı örüntüleri alan primer görsel korteks (s. 108, Resim 5) için de geçerlidir. Gözbebeği ve göz merceğinin retina üzerine haritasını çizdiği görsel sahnedeki ışık örüntüsü, bu şekilde, bilgiyi o yöne taşıyan nöral bağlantıların örüntüsü tarafından tekrar talamus ve görsel korteks üzerine haritalandırılır.

Retinadan talamusa ve görsel kortekse uzanan düzenli bağlantı örüntüsü, görsel sahnenin daha karmaşık özelliklerini algılayan dedektörler yaratmaya da yarar. Görsel kortekste, alıcı alanları yuvarlaktan ziyade küt olan nöronlar vardır.[2] Bu nöronlar en güçlü tepkiyi beneklere değil çubuklara verir. Bazı nöronların alıcı alanları yatay

* *Talamus* adının kullanışlı bir anlamı kalmadı artık. Kökeni, Yunancada "oda" anlamına gelen *thálamos* sözcüğüne dayanır. Beyindeki birçok yapıya, ne işe yaradıkları konusunda kimsenin herhangi bir fikri olmadan önce isim verilmiştir. Bazen verilen isim yapının görünüşünü veya konumunu yansıtır. Örneğin korteks "kabuk" veya "kılıf" anlamına gelir ve bu isim korteksin beynin tamamını kaplama özelliğiyle örtüşür. Talamusun görselliğe duyarlı bölgesinin adı *lateral genikulat nükleus*'tur. Bu isim yan tarafta (lateral) bulunduğu ve şekli kavisli (genikulat "diz" anlamına gelen Latince *genu* sözcüğünden türetilmiştir) olduğu için verilmiştir.

çubuklarla uyuşur, bazıları dik çubuklarla, bazıları da çapraz çubuklarla (ya / ya da \). Çubuklar kalın veya ince, uzun veya kısa olabilir. Şekil 4.3'te, en güçlü tepkiyi dikey çubuklara veren bir nöronun tepki örüntüsü örneği görülmektedir.

Talamus ve görsel korteksteki yön seçici nöronların hepsi "bu hangi açı?" ile "bu nerede?" sorularını bütünleştirir. "Bu nerede?" sorusunun cevabı, bir nöronun alıcı alanının genel konumundan gelir. Yukarı, aşağı, sola, sağa mı bakıyor, yoksa düz mü? Görsel sahnedeki her bir konum, görsel korteksteki farklı bir nöron altgrubu



Şekil 4.3 Primer görsel korteksteki nöronlar görsel uyaranların yönelimine karşı hassastır. Böyle bir nörona nispeten yatay bir çubuk gösterdiğinizde zayıf bir tepki alırsınız, birkaç eylem potansiyeli meydana gelir sadece. Daha dikey bir çubuk gösterdiğinizdeyse uyaran sürerken birçok eylem potansiyeli alırsınız. Başka açılarda eğilmiş çubuklar gösterildiğinde zayıf tepki alırsınız veya hiç almazsınız. Görsel kortekste bu tür çok sayıda nöron vardır. Görsel sahnedeki her konum için o konumdaki uyaranlara tepki veren ama uyaranın farklı yönelimlerine karşı seçici davranan nöron grupları bulunur.

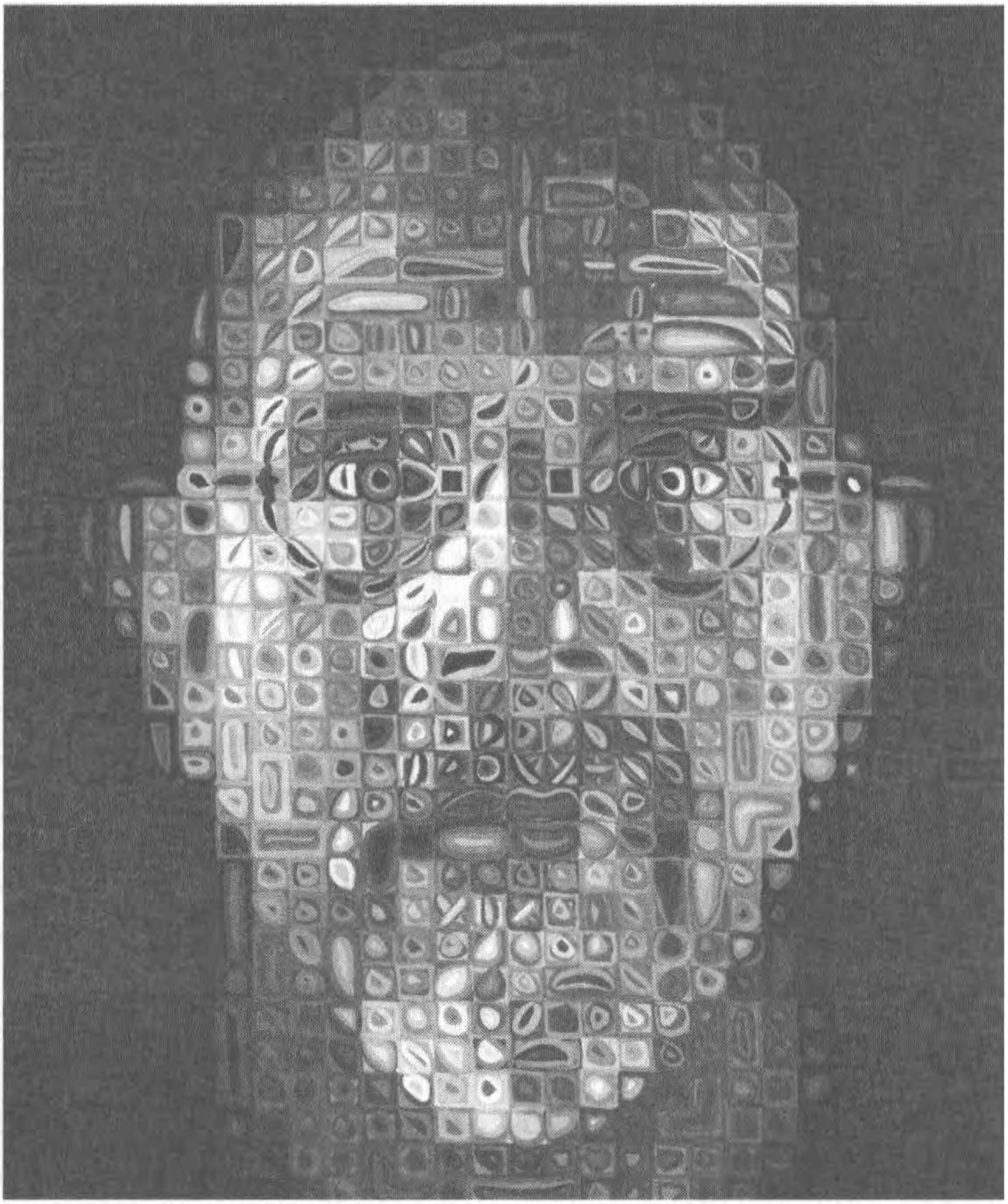
tarafından "izlenir". Bu altgrup içinde bazı nöronlar en iyi yatay açılara, bazıları dikey açılara, bazıları çapraz açılara, bazıları da aradaki açılara tepki verir. Yine bu altgrup içinde benzer konumlara öncelik tanıyan nöronlar bir araya gelmiştir. Yatay öncelikli nöronlar diğer yatay öncelikli nöronların yakınındadır. Grup olarak bu nöronlar, çaprazları tercih eden nöronların yanında yer alır, onlar da dikeyleri tercih eden nöronların yanında bulunur. Kısacası, görsel kortekstеki haritanın iki ölçeği vardır: konum bildiren kaba bir harita ve yönelimi bildiren incelikli alt haritalar. Bu durum, yatay, dikey ve çapraz özellikleri görmemizi sağlar. Görsel sahnenin bu şekilde küçük yönelim algılayıcılarından oluşan kaba bir haritayla döşenmesi, farklı açılara sahip şekillerden yararlanarak portreler yapan Chuck Close'un resimlerine benzer (Şekil 4.4).

Bu nöral temsil, konturların, kenarların ve ışık örüntülerinin bir tondan başka bir tona değişiklik gösterdiği yerlerin vurgulanmasına yardımcı olur ama yüksek kontrastlı bölgeleri gruplar halinde bir araya getirmez. Görsel sahnenin bir bölgesinde tanımlanan kenarlar, henüz başka yerlerdeki kenarlarla ilişkilendirilmemiştir. Kahve kupanızın ve üzerinde durduğu masanın konturları, görsel haritanın ilgili bölgelerinden kuvvetli tepkiler alır ama her biri eşit derecede vurgulanır ve kupayla ilişkili konturların masayla ilişkili konturlardan ayırt edildiğine dair herhangi bir işaret yoktur.

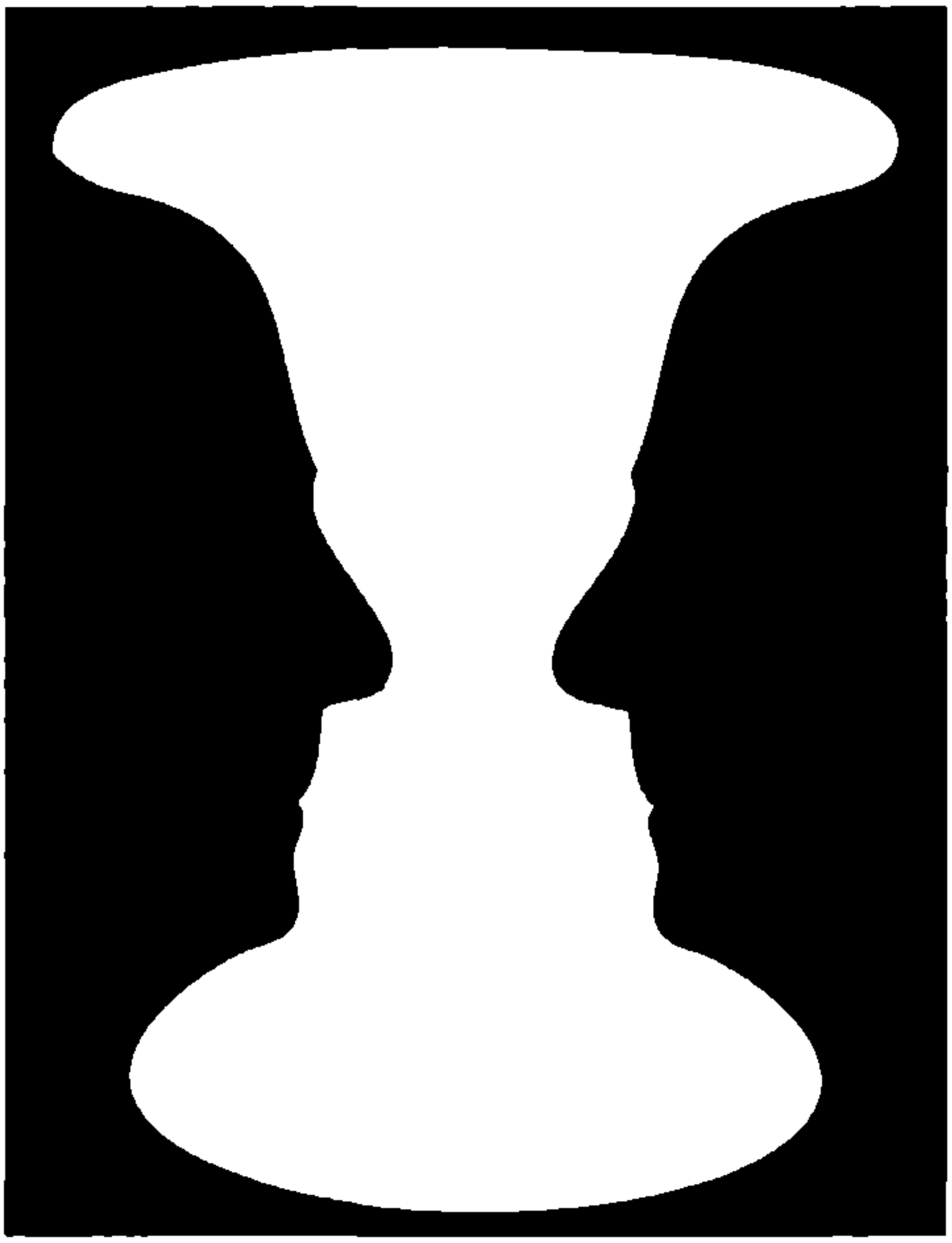
Konturların ilişkilendirildikleri nesne temelinde *gruplandırıldığına* dair belirtilere, görsel kortekstеki bir nöron altgrubunda rastlarız. Bu nöronlar, alıcı alanlarındaki açık renk-koyu renk konturlara, bu konturların çevrelediği nesneye bağlı olarak farklı tepki verirler.

Nesneden neyi kastettiğimizi biraz daha açmamızı gerektiren karmaşık bir tasavvurdur bu. Masa üzerindeki kahve kupası meselesinde, nesnenin anlamı açıktır: Yakınındaki maddelerden farklı, fiziksel bütünlüğü olan, dokunulup hissedilebilen bir maddedir bu. Kahve kupası bir *arka zeminden*, yani içinde fiziksel nesneler barındırabilen ama uzakta, kısmen belirsiz ve/veya daha amorf olabilen bir alandan farklıdır. Arka zeminler nesneler kadar belirgin değildir.

Bir nesneyi bir arka zeminden ayırt etmek kolay da olabilir zor da. Kahve kupası yalnızca masadan değil, yer veya duvar gibi arka zemin oluşturan bölgelerden de daha kolay göze çarpar. Şimdi gelin



Şekil 4.4 Chuck Close'un 2007 yılına ait *Otoportre* adlı bu resmi, görsel korteksin düzenini hatırlatıyor bana. Kaba bir ölçek genel şekli –resimdeki sanatçının suretini veya beyindeki görsel sahne haritasını– oluşturur. Daha ayrıntılı ölçekte ise, Close'un çeşitli konumlarda kullandığı yuvarlak veya dikdörtgen küçük şekillerden oluşan pikselleri, nöronların alıcı alanlarını ve bu alanların belli konumlardaki yönelimlere olan hassasiyetlerini akla getirir.

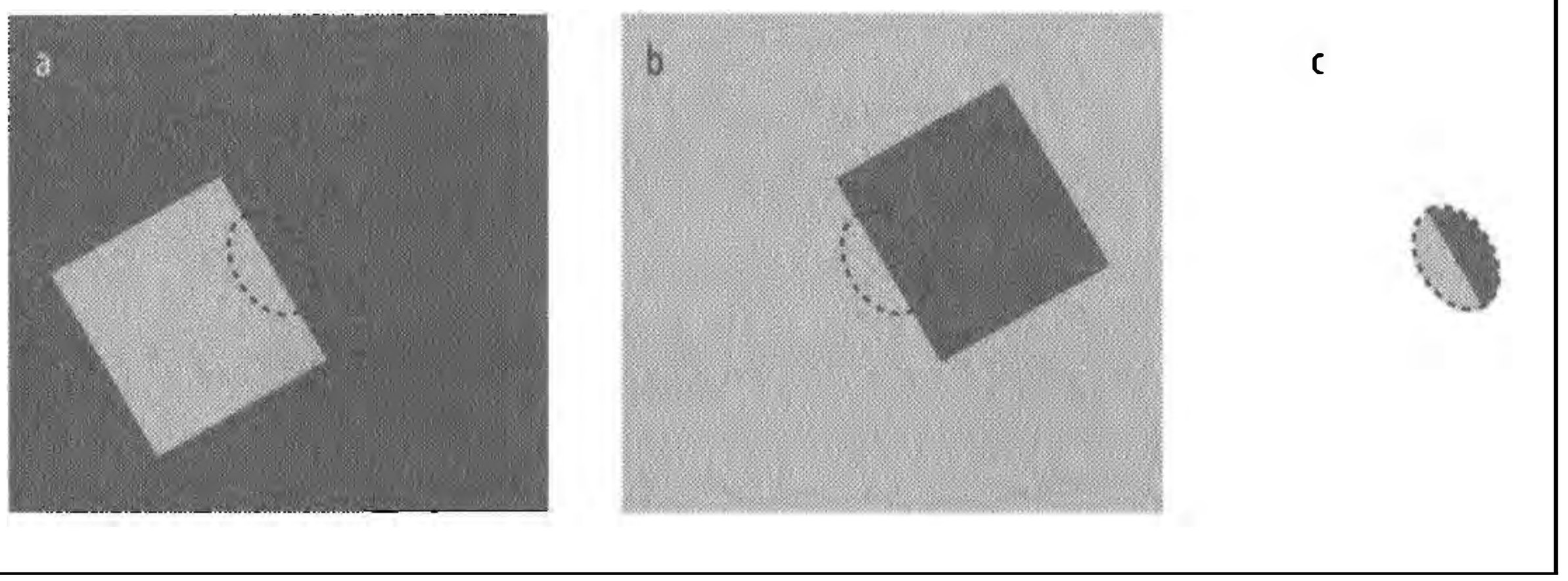


Şekil 4.5 Bu resimde ne görüyorsunuz? İnsanlar mı? Yoksa içine çiçek konabilecek bir şey mi?

Şekil 4.5'teki gibi daha belirsiz olan bazı yanılsamalara bir bakalım.

Ne görüyorsunuz? İki şeyden birini görüyor olmalısınız: ya birbirine bakan iki surat silueti ya da bir vazo. İlk bakışta hangisini görmediyseniz tekrar bakın: Ne aradığınızı bilerek baktığınızda onu algılayabilecek misiniz bakalım. Bu ünlü illüstrasyonun adı Rubin'in vazosu/profilidir. Resim muğlaktır; eşit derecede mantıklı olan iki ayrı şekilde algılanabilir.

Gerek belirgin kahve kupası meselesinde gerekse muğlak vazo/profil yanılsamasında, beynimiz imgelerin açık ve koyu örüntülerini *yorumlayarak* bir nesnenin bir sınırın *hangi tarafında* olduğunu belirler. Kahve kupası vakası açık ve otomatiktir, çünkü yalnızca bir yorum vardır. Vazo/profil vakası ise muğlaktır, çünkü iki makul yorum söz konusudur: açık renk bir arka zemin üzerinde iki koyu renk surat veya koyu renk bir zemin üzerinde açık renk bir vazo.

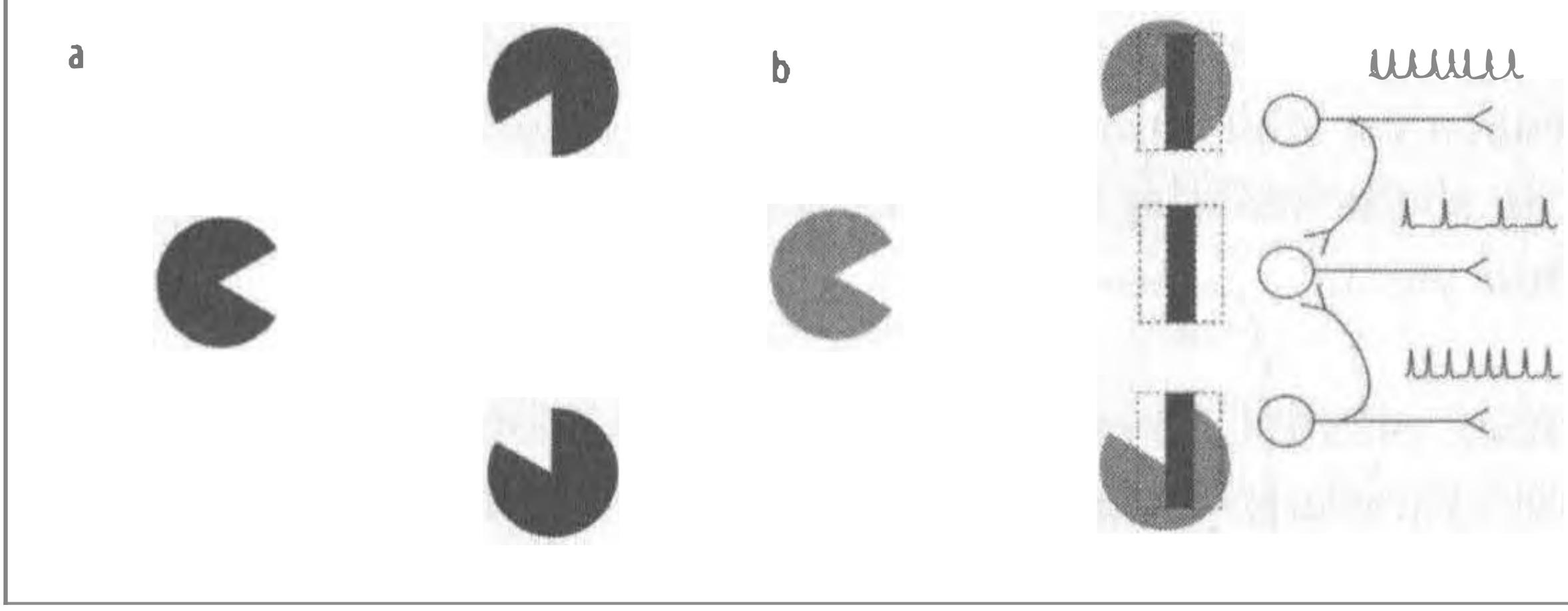


Şekil 4.6 Görsel kortekstеki bazı nöronlar, alıcı alanlarındaki aynı koyu ve açık renk örüntülere, koyu renk kısmın veya açık renk kısmın nesneyi oluşturmasına bağlı olarak farklı tepki verirler. Oval şekille gösterilen bir alıcı alanı ele alalım: *a* ve *b*, *c*'deki ovalin içinin sahip olduğu aynı "sol taraf açık, sağ taraf koyu renk" örüntüsüne sahiptir ama *a*'da açık renk taraf, koyu renk zemin üzerinde açık renk bir karenin bir parçasını oluştururken, *b*'de koyu renk taraf, açık renk zemin üzerinde koyu renk bir karenin bir parçasını oluşturur. Tepki örüntülerinde a ile b'yi birbirinden ayıran nöronlar için sınır sahipliği hassasiyeti var denir. Bu hassasiyeti ne tür bir devrenin ortaya çıkardığı bilinmiyor.

İlginç bir biçimde, alıcı alan her iki durumda da aynı açık-koyu uyaranını aldığı halde, görsel kortekstеki bazı nöronlar birinde açık renk tarafın diğerindeyse koyu renk tarafın nesneyi oluşturduğu iki ayrı örüntü seçer.[3] Buna *sınır sahipliği hassasiyeti* (*border ownership sensitivity*) adı verilir (Şekil 4.6).

Bu nöronların bu hassasiyete nasıl sahip olduğunu kimse bilmiyor. Ama bunun bir şekilde, alıcı alanları başka yerlerde olan nöronlardan gelen bağlantılarla –alıcı alan içindeki ışığa verilen tepkileri, daha geniş ışık örüntüsünü temel alarak şekillendiren bağlantılarla– ilgisi olmalı.

Vazo/profil yanılsaması, nesnenin koyu renk haline açık renk halinden daha iyi tepki veren sınır-sahipliği nöron popülasyonunun bu yanılsamadaki göreli katkılarını yansıtıyor olabilir. Suratları görmenizin nedeni belki de koyu renk sınır-sahipliği nöronlarınızın biraz baskın olmasıdır. Nesne olarak vazoyu görüyorsanız, açık renk sınır-sahipliği nöronlarınız biraz daha kuvvetli tepki veriyor demektir. Bunun böyle olduğundan emin değiliz, ama mantıklı bir varsayım gibi görünüyor.



Şekil 4.7 Kanizsa üçgeni (*a*): Üç siyah daireyi kısmen örten beyaz bir üçgen algılıyor olmalısınız. Üçgenin kenarları, köşeleri/siyah daireler hariç açık biçimde görülmez. Bunlara hayali kontur adı verilir. Hayali kontur algısında rol oynuyor olabilecek nöral devre (*b*): Kesik hatlar, dikey çubuklara karşı hassas olan üç nöronun alıcı alanını gösterir; bu nöronlar alıcı alanın merkezindeki koyu renk çubuklara karşı uyarıcı tepkiler verirler. Kanizsa üçgeni imgesinin köşeleri şekilde üç alıcı alanın ikisinde gösterildiği gibi hizalandığında, bu nöronlar net uyarıcı tepkiler gösterirler. Uyaranın bu alıcı alanlar için mükemmel veya optimal bir uyaran olmadığını ama nöronları belli ölçülerde uyarmaya yettiğini belirtelim. Bu iki nöron uyarıcılıklarını bir sinaps bağlantısıyla ortadaki nöronla "paylaştığında" üç nöronun üçü de aktif olur ve aktiviteleri köşeler arasında uzanan bir hat veya kontur olarak yorumlanabilir.

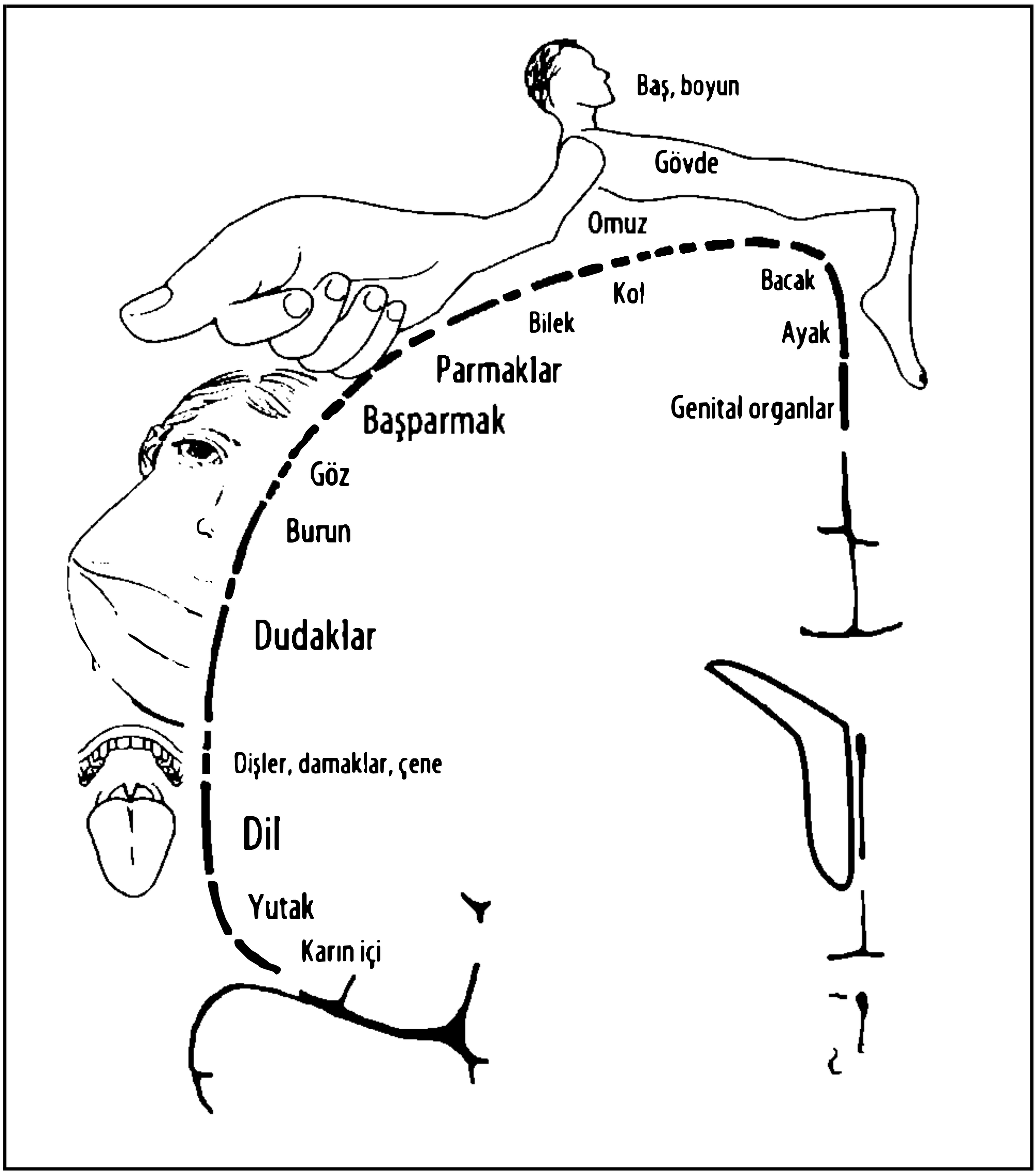
Başka bir göz yanılsaması, imgenin farklı bölgelerinden gelen bilgilerin paylaşılmasının –en azından ilkesel olarak– nasıl işe yarayabileceğini gösterir. Şekil 4.7'de, üç kenarı boyunca sınırı kesintisiz devam eden beyaz bir üçgen görüyor olmalısınız. Ama orada gerçekten de beyaz bir üçgen var mı? Gerçek sınırlar sadece köşelerin her birinde yer alan "kayıp pizza dilimleri"ndedir. *Hayali konturlar* olarak adlandırılan bu algı, nöronlar ile bir dizi nöral aktivite arasında kurulan bağlar sonucu ortaya çıkıyor olabilir. Önce, alıcı alanları kayıp pizza dilimlerinin olduğu yerde bulunan yön seçici nöronlar harekete geçer. Bu nöronlar, imgedeki gerçek açık ve koyu örüntülere "doğrudan" tepki verir.* Sonra bu nöronlar başka nöron-

* Tam anlamıyla doğrudan sayılabilecek bir tepki değildir bu elbette; nöron başka nöronlardan girdi aldığı için, fotoreseptörlerin başlattığı aktivitenin girdisini aldığı için tepki verir. Burada, gerçek bir uyaranın tetiklediği aktivite ile komşu nöronların aktivitesinden çıkarsanan faaliyet arasında bir ayrım söz konusudur.

ları harekete geçirir; özellikle de benzer yön önceliklerine sahip olan ama alıcı alanları kayıp pizza dilimleri arasında kalan boş alanlar boyunca yer alan nöronları. Görsel harita bu şekilde, bilinen kenarlar ile sözde kenarlar arasındaki boşlukları "doldurarak" hayali bir kontur yaratır.

GÖRSEL SİSTEM, beynin mekânsal bilgiyi düzenlemek için haritalardan yararlandığı tek yer değildir. Dokunma duyunuzda da büyük oranda benzer şeyler yaşanır. 3. Bölüm'de gördüğümüz üzere, her dokunma reseptörü vücut yüzeyinin belli bir bölgesini kontrol eder; bu belli bölge o reseptörün alıcı alanıdır. Bu dokunma reseptörlerinden gelen sinyaller, deri içindeki reseptörden omuriliğe kadar uzanan oldukça uzun aksonlar üzerinden gönderilir. Dolayısıyla nöronlar şaşırtıcı bir uzunlukta olabilirler; örneğin ayak parmağınızın ucundan başlayıp arkanızdaki omuriliğe kadar uzanabilirler! Aynı yerden çıkan aksonlar birlikte yolculuk eder ve omurilikteki komşu nöronlarla sinaps oluştururlar; omurilikteki komşu nöronlar da talamusun vücut bölgesindeki komşu bölgelere, oradan da kortekse akson gönderirler. Bütün yol boyunca girdi örüntüsü, vücut yüzeyi üzerindeki lokasyon örüntüleriyle örtüşmeyi sürdürür; böylece ayak parmağı, dirsek veya burundan kaynaklanan girdiyi alan nöronlar farklı bölgelerde bir araya gelirler. Derinizin vücut yüzeyi haritası, beyne kadar giden bu nöral yolun her evresinde bu şekilde kopyalanır. Vücutla ilgili bilgilerden sorumlu korteks olan somatosensori korteksteki durum Şekil 4.8'deki gibidir.

Beyinde bir vücut bölümüne ayrılan yerin büyüklüğünün o bölümün büyüklüğüyle orantısız olabildiğine dikkat edin. Bu noktayı ilk kez epilepsi cerrahı Wilder Penfield 1930'lar ile 1950'ler arasında gerçekleştirdiği çalışmalar sırasında keşfetmiş ve bunu çizdiği tuhaf bir resimle tasvir etmiştir.[4] Dudaklara ayrılan kısım çok büyüktür, ele ayrılan kısım surata ayrılan kısım kadardır ve surat bacakların tamamına ayrılan kadar yer işgal eder. Bunun nedeni, yüz ve ellerde belli bir birim alana baldırın ön kısmından daha fazla reseptör düşüyor olmasıdır. Daha fazla reseptör demek, gelen bilgiyi işlemek için daha fazla beyin dokusuna ihtiyaç duyulması demektir. Ama bu yoğun reseptörler, uyaranın nerede olduğu, ne büyüklükte



Şekil 4.8 Bu çizim, somatosensori korteksteki vücut haritasının düzenlenişini göstermektedir. Ellerle dudakların diğer bölgelere oranla ne kadar büyük olduğunu görüyor musunuz? Somatosensori korteks beyninizin (önden arkaya doğru) orta kısmındadır ve başınızın tepesinden kulaklarınızın yakınlarındaki bölgelere kadar uzanır. Hareketlerimizin yönlendirilmesinden sorumlu olan motor korteksin yanındadır. Motor kortekste de benzer bir vücut haritası vardır. Bu haritalar, öncü epilepsi cerrahı ve bilimadamı Wilder Penfield tarafından tanımlanmıştır.

olduğu, nasıl bir şekle sahip olduğu vb. konusunda daha incelikli bilgi sunarlar.

Bunun nasıl işlediğini anlamanızı sağlayacak bir test yapalım. Bu test en iyi gözleriniz kapalıyken ve yanınızda biri varken yapılır, ama kendi başınıza da yapabilirsiniz. Bir ataş alın ve U şeklini alacak, iki ucu arasında yarım santim kadar bir mesafe kalacak biçimde açın. Başparmağınızın etli kısmına iki ucu değdirin. Ataşın iki ucu-

nu da gayet iyi hissedeceksiniz. Şimdi de aynı şeyi başparmağınızın arka kısmına uygulayın. Bir değil, iki ucun değdiğini anlamakta güçlük çekeceksiniz. Uçları biraz daha, belki bir santim kadar açtığınızda, başparmağınızın arka kısmında iki ucu net biçimde ayırt edeceksiniz. Aynı şeyi ön kolunuzda deneyin. Açıklık yeterli değil, değil mi? Burada iki buçuk-üç santimlik bir açıklık gerekecektir.

Vücudumuzun en yüksek mekânsal çözünürlüğe sahip bölgeleri, dokunsal keşif veya konum algılamada en önemli rolü oynayan bölgeleridir. Ellerimiz uzanıp nesnelere dokunur ve onların şekil ve dokusuyla ilgili bilgi toplar. Yemek yerken ağzımız, yiyeceğin yumuşaklığı veya sertliği konusunda çok hassastır; dilimiz her lokmayı çiğnenmek üzere dişlerimize yönlendirir. Bebekler ve birçok hayvan türü, yiyecek olmayan nesneleri tanımak için ağızlarını kullanır. Konuşurken dilimiz daha farklı bir rol üstlenir, sesbirimlerin (fonemler) seslerini şekillendirir. Dilin konumundaki çok ince farklılıklar R sesi ile L sesi arasındaki farkı yaratır. Sırt ve bel bölgelerinizin ise ellerinizden ve dilinizden farklı bir rolü vardır, fiziksel olarak kol ve bacaklarınızı destekler, dolayısıyla mekânsal konumla ilgili incelikli bir duyarlığa sahip olmasına gerek yoktur. Hem zaten sırtınıza uzanıp bir sivrisineğe vurmak da hiç kolay değildir!

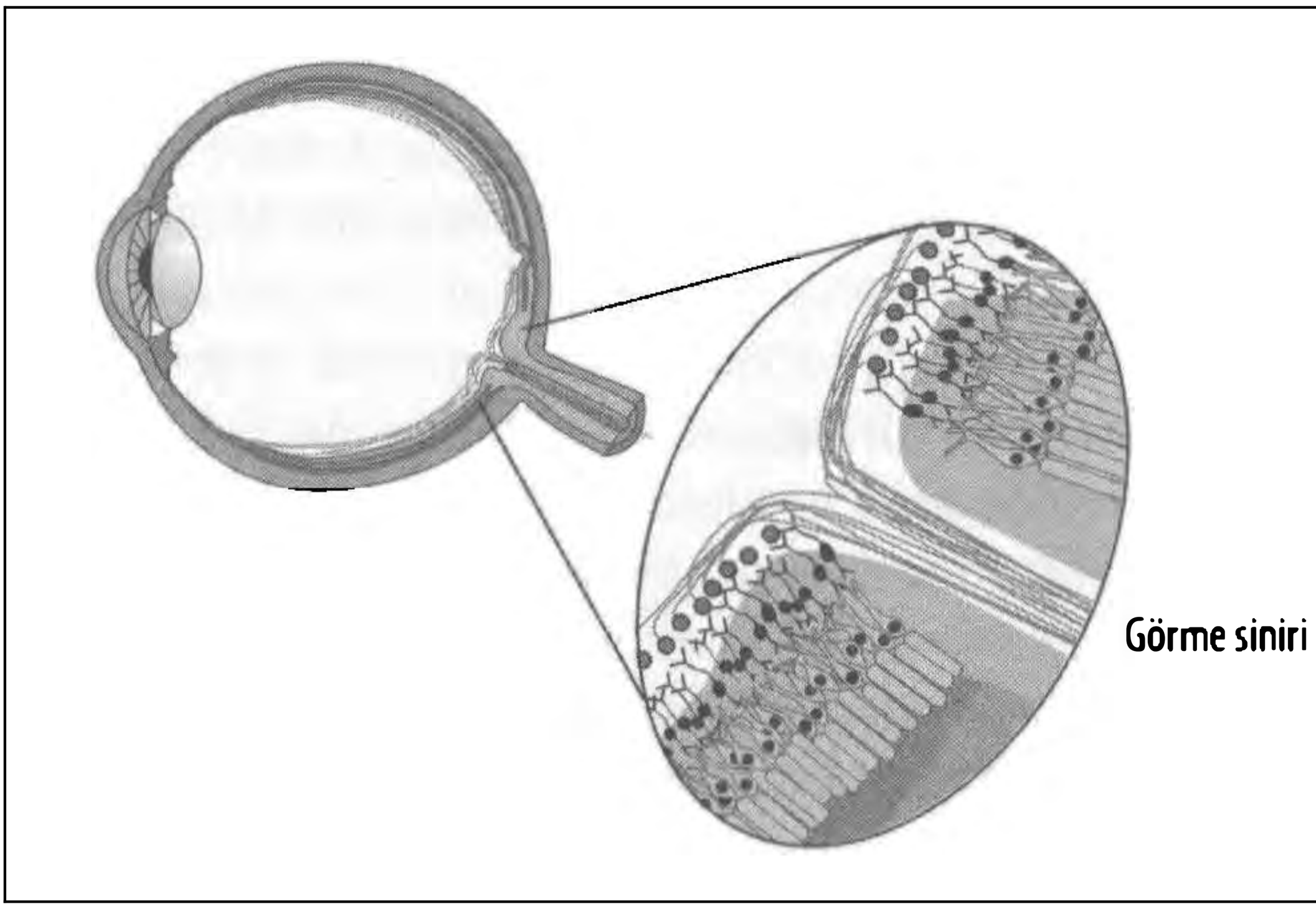
Mekândaki bu tahrifat görme sisteminde de vardır, en azından insanlarda ve bazı hayvanlarda. Fotoreseptörler retinanın ortasında, *fovea* adıyla bilinen yerde tıkış tıkış toplanmıştır. Bu durum çok yüksek derecede mekânsal çözünürlük sağlar ama yalnızca görsel sahnenin foveaya düşen imgesinde. Şimdi gözlerinizi sayfanın bu noktasına sabitleyin ve gözlerinizi oynatmadan, okuduğunuz satırın bir-iki satır üstündeki veya altındaki sözcükleri seçmeye çalışın. Çok zorlanacaksınız. Yalnızca foveanın baktığı yerleri net olarak görebilirsiniz. Görsel sahnenin foveadaki kısmı, beynin görme alanlarında daha geniş yer talep eder, tıpkı beyinde dokunma duyusuna ayrılan devasa bölgelerde olduğu gibi.

Beynin mekânla ilgili bilgilerin düzenli akışını sağlamak için haritalardan yararlandığını, nöronların alıcı alanları olduğunu ve başka nöronlarla aralarında mekân algısının kilit özellikleriyle paralellik gösteren bağlantı örüntüleri bulunduğunu gördük. Peki ama bu bi-

yolojik niteliklerin zihinde gerçekten de algı deneyimine *neden olduğunu* nasıl biliyoruz? Beynin her faaliyetinin farkındalık üretmediği kesin. Örneğin, şu anda kalbinizin ne kadar hızlı attığı konusunda hiçbir fikriniz yoktur muhtemelen, beyniniz düşünce ve hislerinizi nasıl kontrol ediyorsa kalp atış hızınızı da aynı şekilde kontrol eder. Öyleyse, zihindeki farkındalık deneyimi veya bilinç nasıl ortaya çıkar? Zihin-beyin bağlantısı henüz tam olarak bilinmiyorsa da, bu beyin haritalarının bazılarının zihinsel yaşamımıza önemli katkılarda bulunduğuna dair kanıtların sayısı giderek artıyor. Aşağıdaki örneklere bakın mesela.

Ampütasyon veya kaza sonucu kolunu veya bacağını kaybeden insanlar kayıp uzuvlarını hâlâ "hissedebilirler". Vücudun yitirilmiş bölümü kaşınabilir, acıyabilir veya ağrıyabilir mesela. Uzuv gitmiştir, dolayısıyla bu tür duyular gerçek değildir: Bu duyular zehirli sarmaşıktan, uzvunuza çarpan bir toptan veya çok fazla kayak yapmaktan kaynaklanıyor olamaz. Ama bu duyular uzvunu kaybeden kişi için gerçektir. Bunlar bahsi geçen beyin haritalarından birindeki, kayıp vücut bölümünden girdi alan bir bölgedeki nöronların kazara --onları harekete geçirecek gerçek bir uyaran olmadan– faaliyete geçmesinden kaynaklanır muhtemelen. Bu nöronlar *kendiliğinden* faaliyet (nöronlar her zamanki girdilerini almadıkları halde ortaya çıkan elektrik atımları) adını verdiğimiz şeyi gösteriyor olabilir. Sonraki nöronlar da –yani bu nöronlardan girdi alanlar– gerçek bir girdi sinyalinin başlattığı faaliyeti, kendiliğinden oluşan faaliyetten ayırt edebilecek durumda değildir. Bütün sinyaller gerçek sinyal olarak yorumlanır. Dolayısıyla, artık yerinde olmayan uzuvdan girdi alamayan nöronlar yine de ateşleme yaparlar, faaliyetleri o uzvun hâlâ yerinde olduğu ve ona bir şeylerin dokunduğu, onu acıttığı veya ağrıttığı hissi yaratır. Bu olay *hayalet uzuv sendromu* adıyla bilinir.[5]

Ayrıca haritalardaki boşluklar da buralardan uyaran alınamamasına neden olur. Bu durum beyin hasarından kaynaklanabilir; örneğin bir inme sonucu beynin belli bir bölgesine kan tedarik edilemez ve oradaki nöronlar oksijensiz kalarak ölür. İnme sonucu hasara uğramış olan damar küçükse o bölgedeki hasar küçük, damar büyükse hasar da büyük olur. Küçük inmeler, konumuzla alakalı olarak ilginç sonuçlara neden olur. Görsel kortekste küçük bir damar çatlar veya

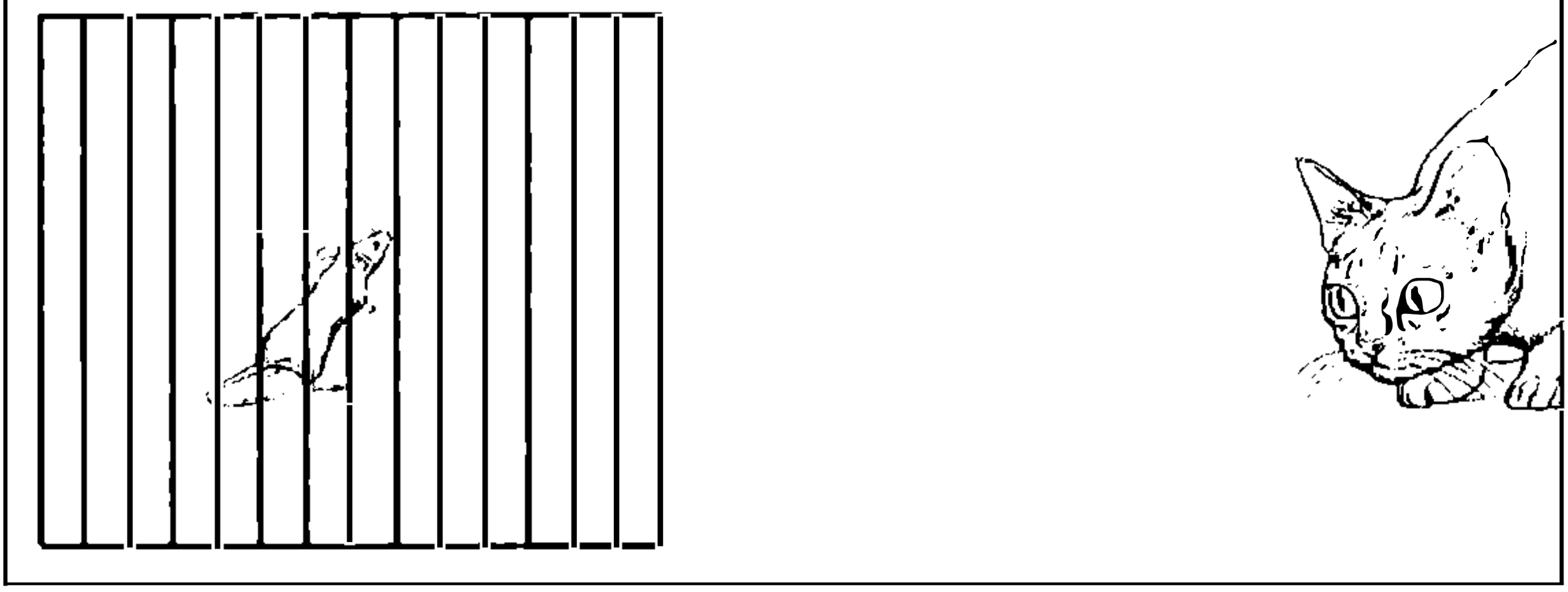


Şekil 4.9 Retinada hiçbir fotoreseptörün olmadığı, kör nokta adıyla bilinen bir boşluk bulunur. Görme siniri burada biçimlenir. Bu noktada hiçbir şey göremezsiniz.

tıkanırsa ve oradaki ölü nöronlar görsel sahnenin belli bir bölümüne karşılık gelen nöronlarsa, o bölge kör olur – ama yalnızca o bölge.

Duyu haritalarındaki boşluklar doğal yollarla da oluşur. Aslında, herkesin fotoreseptör katmanlarında, her gözde bir olmak üzere iki delik bulunur (Şekil 4.9). Memelilerde fotoreseptörler retinanın arkasında, retinal ganglion hücreleri dahil diğer nöronlar da onların önünde yer alır. Retinal ganglion hücrelerinin bir araya gelip fotoreseptör katmanından geçerek görme sinirini oluşturduğu yerde haritada bir boşluk vardır. Fotoreseptörler kenara itilmiştir. Bu durum, ortada ışığı algılayacak hiçbir fotoreseptörün bulunmadığı bir kör nokta yaratır. Bunu muhtemelen çok sık fark etmezsiniz. Kör noktalar küçükse, beynimiz deliğin etrafından elde ettiği bilgilerden bir tahmin yürüterek kayıp ayrıntıların "içini doldurur." Şekil 4.10'a bir bakın.

Sağ gözünüzü kapatın ve sol gözünüzle kediye bakın. Gözünüzü kediden ayırmamaya çalışın. Şimdi sayfayı yavaşça yüzünüze yaklaştırın. Belli bir mesafede fare yok oluyor mu? Bu durum, sayfa gözlerinizden otuz santim kadar uzaktayken gerçekleşiyor olmalı.



Şekil 4.10 Sağ gözünüzü kapatıp kediye bakın. Resme doğru mesafeden (otuz santim kadar uzaktan) ve yeterince sabit bakarsanız, fare yok olacaktır. Başka ne görüyorsunuz? Doğru mesafe bu resmin büyüklüğüne göre değişir. Kör noktanız foveanızdan 15 derece uzaktadır. Kedinin yüzü fareden yedi buçuk santim uzaktaysa, resmi otuz santimden az bir mesafede tutun. Resmi daha küçük bir ekrandan görüyorsanız ve kedi fareye daha yakınsa, gözünüze doğru biraz daha yaklaştırın.

Fare yok olduğunda ne görüyorsunuz? Hiçbir şey mi? Yoksa kafes yerinde duruyor ama boş mu? Kafesin telleri kör noktayı "dolduruyor" olmalıdır. Kafes telleri kör noktanın kenarlarının biraz dışına kadar uzanırken farenin imgesinin tamamı bu kayıp bölgenin içinde kalır. Böylece beyin kafes tellerinin arada hiçbir şey olmadan devam ettiği sonucuna varır. Farenin hatları görünmediği için farenin yerini doldurmanın da imkânı yoktur. Bu boşluk doldurma işlemi Kanizsa üçgeninde de geçerlidir. Bir boşluk tarafından müdahaleye uğrayan ama diğer tarafa doğru düzgün bir şekilde giden kenarların dümdüz devam ettiği varsayılır. Beyniniz uydurur ama bunu mevcut verilere dayanarak ve her iki durumda da yakınındaki görsel ipuçlarının yardımıyla tahminde bulunarak yapar.

Normal şartlarda gözlerin ikisi birden bakarken, bir gözün kör noktası ile diğer gözün kör noktası farklı yerlere tekabül eder. Diğer gözünüzü kapatıp kediye ve fareye bakmayı deneyin, fareyi gayet iyi göreceksiniz. Yani her göz diğerinin yedeği olarak hizmet verir. Diğer göz olmadığında beyin kör noktanın boşluğunu çevreden doldurur.

Görme sinirinde harabiyete yol açan bir göz hastalığı olan glakomdan mustarip kişilerde birçok kör nokta oluşabilir. Sinir lifleri,

yani retinal ganglion hücrelerinin aksonları olmadığından, retinal ganglion hücrelerinden gelen bilgiler artık beyne ulaşamaz, kör noktalar oluşur ve hastalık ilerledikçe bu kör noktalar daha da büyür. Hastalığın daha ilk evrelerinde hastanın bu durumu fark edeceğini düşünebilirsiniz, ama öyle olmaz: Nasıl ki normal kör noktanızı fark etmiyorsanız, bu anormal kör noktaları da fark edemezsiniz. Genellikle diğer gözde de kör noktalar olur ama bunlar aynı yerlerde bulunmaz ve iki göz birlikte çalışarak tıpkı normal gözler gibi her yeri görebilir. İki gözün kör noktaları çakışsa bile, beyin çevredeki makul şeylerle boşluğu doldurabilir veya göz hareketlerinden elde edilen bilgileri birleştirebilir (farenin yok olması için gözlerinizi sabit tutmanız gerektiğini hatırlayın).

Glakom nedeniyle yaşanan göz kaybı, görsel alan testiyle tespit edilebilir. Bu testte hasta bir noktaya bakar ve görme alanının her tarafına kısa aralıklarla soluk bir ışık çakılır. Test her iki göze ayrı uygulanır, test sırasında göz hareket etmez ve çevrede boşluğu doldurdacak hiçbir şey bulunmaz. Bu ışık çakmalarından bazılarını göremezseniz, glakomdan görme kaybınız vardır muhtemelen.

BEYİN HARİTALARI hareketi algılamamıza da yardımcı olur; görsel dünyamızın temel özelliklerinden biridir bu. Nesnelerin sınırlarını algılamada olduğu gibi, hareketi belirleme de duyu bilgilerinin (farklı yerlerdeki ışığın) kıyaslanmasıyla gerçekleşir. Ama hareket-te, kıyaslama yalnızca mekânda gerçekleşmez, zaman içinde de gerçekleşir: Işığın farklı yerlerde nasıl *değiştiği* değerlendirilir (s. 108, Resim 6). Hareket algısında beyin haritalarının kusursuz olması önemlidir. Bu haritalar hasar gördüğünde veya yanıltılıp hatalı faaliyet içine girmelerine neden olunduğunda ilginç yanılsamalar meydana gelir.

Konuyu evrimsel açıdan değerlendirirsek, hareket eden şeyin fark edilmesi önemlidir, çünkü o şey canlı olabilir. Canlı olan, hareket eden bir şey sizi yiyebilir (bu ayı da olabilir, sivrisinek de) veya tadı güzel olduğu için yakalayıp yemek isteyebileceğiniz bir şeydir. Hareketi algılayabilirseniz hayatta kalma şansınız artar. Aksi takdirde, çevrenizde hareket eden şeyleri fark edemezseniz, kısa sürede işiniz biter. Bu nedenle doğal seçilim beyinde hareketi tanıyan uz-

manlaşmış bir sistem geliştirmiştir.

Bir şeyin hareket edip etmediğini belirlemek, temel olarak, zamanın bir noktasında gördüğümüz şeyi zamanın bir başka noktasında gördüğümüz şey ile kıyaslamayı içerir. Gördüğümüz bu şeyler farklıysa, sahnedeki bir şey hareket ediyor olabilir demektir. Peki ama beyin zaman içindeki bilgileri nasıl kıyaslar? Hareketli görme olayında beynin görsel sahne örneklerini zaman içinde kaydırdığı düşünülüyor. Beyin bazı örnekleri hızlı, bazılarını daha sonra işlemden geçirir ve bu sayede yeni ve eski bilgileri kıyaslayarak bir şeyin hareket edip etmediğini belirler.

Bunun için beynin nöronların belli elektriksel ve kimyasal niteliklerinden yararlanarak, tıpkı hız sınırı sistemlerinin ve trafik ışıklarının yaptığı gibi, "trafiği" (bu durumda eylem potansiyellerini) düzenlediği düşünülüyor. Bunu gerçekleştirmenin bir yolu, iletimdeki gecikmeler (sinyallerin bir işlem evresinden diğerine geçiş süresi) arasındaki farklılıkları içerir. Eylem potansiyelleri aksonlar boyunca saniyede birkaç metre ile saniyede yüzlerce metre arasında değişen bir hızla yol alır.[6] Örneğin saniyede 10 metre hız ve 1 cm'lik mesafede bu, 1 ms'lik bir gecikme demektir. Saniyede 100 metre hızla aynı mesafede gecikme 0,1 ms olacaktır. Hızlı iletimler kalın nöronlarda, yani yalıtımı (miyelin) kalın olan nöronlarda gerçekleşir, tıpkı çok şeritli geniş otoyollar gibi. Yavaş iletimlerse daha küçük, yani miyelinsiz liflerde gerçekleşir, tıpkı dar köy yolları gibi.

Sinyalleri farklı zaman aralıklarıyla geciktirmek sinapslarla da mümkündür. Bir *kimyasal sinapsın* iletimi (bu iletim, yukarıda da sözünü ettiğimiz gibi bir nörotransmitter aracılığıyla gerçekleşir) yarım ila bir milisaniyede gerçekleşir. Kimyasal sinaps gecikmeleri, nörotransmitterin ve bağlandığı reseptörlerin doğasına ve bu reseptörlerin alıcı nöronun elektriksel durumunu kontrol ediş biçimine bağlı olarak değişiklik gösterir. Alıcı nörondaki reseptörler, iyon kanallarının kapanması veya açılmasıyla sonuçlanan uzun bir kimyasal tepkime zincirini tetiklerse, elektriksel tepki daha yavaş gerçekleşir. Reseptörler iyon kanallarını doğrudan açar veya kapatırsa, elektriksel tepki daha hızlı olur. Kimyasal sinapslar trafik ışıklarına benzer, uzun süreli de olabilir kısa süreli de. Elektriksel sinapslar ise hızlı bir trafik akışının olduğu dönel kavşak gibidir. Her sinapsta

bir nöron bir sonraki nöronla aşağı yukarı doğrudan birleşir. Sonra elektrik sinyali çok vakit kaybetmeden bir sonraki nörona doğrudan aktarılır.

Aynı zamanda ortaya çıkan görsel sinyallerin, yollarını ayırarak birçok kopya halinde beyindeki hızlı ve yavaş yollardan ilerlediği düşünülüyor. Bu yolların tekrar bir araya geldiği yerde nöronlar, hızlı yoldan yakın geçmişten gelen girdileri, yavaş yoldan da uzak geçmişten gelen girdileri eşzamanlı alır. Nöronlar hızlı girdi kanalı aracılığıyla dünyanın "şimdi" nasıl olduğunu "görürler".* Yavaş kanal aracılığıyla ise dünyanın birkaç milisaniye önce nasıl olduğunu görürler. Beyin, görsel sahnenin bu iki anlık görüntüsünü kıyaslayarak değişiklikleri, yani bir şeylerin hareket etmiş olabileceğine işaret eden değişikleri anbean tespit etmenin pratik bir yolunu bulmuş olur.

Daha önce kenar algısında gördüğümüz gibi, uyarıcı ve ketleyici sinaps kombinasyonları, görsel sahnedeki değişiklikleri zaman içinde vurgulama görevi görebilir. Bir sinir yolundaki girdi uyarıcı sinaps, başka bir sinir yolundaki girdi de ketleyici sinaps (alıcı nöronun kendi eylem potansiyelini ateşleme imkânını *azaltan* nörotransmitter reseptörler) kullanır. Ketleyici sinapsları yavaş işleyen yolun kullandığını düşünelim. Görsel sahnedeki "şimdi" ve "2 ms önce" imgelerinin aynı olduğu yerlerde, "şimdi" uyarıcı sinyalleri ile "2 ms önce" ketleyici sinyalleri dengede olacak ve zar potansiyeli temel değerine yakın bir değerde olacaktır. Ama imgenin değiştiği yerde, "şimdi" ve "2 ms önce" sinyallerinin dengeleri bozulacak, ya temel aktiviteden daha yüksek ya da daha düşük olacaktır.

Ne var ki, *değişiklik* olması mutlaka *hareket* olduğu anlamına gelmez. Az önce tarif ettiğim ikili nöral devre, yani hızlı ve yavaş nöral devre, hareket eden şeylere olduğu gibi hareket etmeyen ama değişen şeylere de tepki verir. Örneğin bir kavşaktaki yanıp sönen sarı ışık sabit ama değişen bir sinyaldir; otomobillerse konum de-

* 2. Bölüm'de de gördüğümüz üzere, aslında retinadaki fotoreseptörler ışığı nöral aktiviteye dönüştürmede yavaş davranır, dolayısıyla görsel sistemdeki "şimdi" daha baştan milisaniyenin onda biri oranında gecikir ve gecikmeler en kısa ve en hızlı yollarda bile her aşamada birikerek artar. Buradaki tartışmanın amacı gereği, bu sabit gecikmeleri yok farz ediyoruz.

ğiştirirler. Basit değişim ile gerçek hareketi birbirinden ayırmak ve bir şeyin hangi *yönde* ve *hızda* hareket ettiğini belirlemek için beynin bir numaraya daha başvurduğu düşünülmektedir: Yalnızca aynı konumdan farklı zamanlarda gelen anlık görüntüleri kıyaslamakla kalmaz, *farklı* konumlardan farklı zamanlarda gelen anlık görüntüleri de kıyaslar. İki farklı konumdan farklı zamanlarda gelen anlık görüntüler *özdeş* ise, bu bir şeyin birinci yerden ikinci yere doğru hareket ettiği anlamına gelebilir. Sayfa 108'deki resimde, anlık iki görüntüde aynı motosikletin yer aldığını hayal edelim. Aynı motosiklet farklı zamanlarda farklı konumlarda görülüyorsa, beyin son derece mantıklı biçimde motosikletin hareket ettiği sonucuna varır.

Görsel sahnedeki bütün konumları kontrol etmek ve birçok muhtemel yön ve hızı değerlendirmek için beynin bu tür çok sayıda devreye ihtiyacı vardır. Bu bağlantılar mekânsal ve zamansal dengeler içerecektir muhtemelen. İlginç biçimde, hareketin varlığında beynin ölçebileceği mekân ve zamanın bir sınırı vardır, hareket algısında da bununla orantılı sınırlar söz konusudur. Örneğin bir saate baktığınızda, saniye ibresinin hareket ettiğini rahatlıkla görebilirken akrep ve yelkovan size hareket etmiyormuş gibi gelecektir. Gerçekte üçü de hareket etmektedir ama akreple yelkovan beynin tespit edemeyeceği yavaşlıkta hareket eder. Uyaranlar hareket ettikleri anlaşılamayacak kadar hızlı da hareket edebilirler. Tavan vantilatörü en yavaş ayarında çalışırken pervaneleri algılayabilirsiniz, ama hızlı ayara geçtiğinizde pervaneler flulaşır, çünkü hareket sistemimizin tespit edemeyeceği kadar hızlı hareket etmektedirler. (Tıpkı filmlerin, televizyonun ve bilgisayar ekranının gözle görülemeyecek kadar hızlı titremesi gibi.)

Bir şeyin hareket ettiğini bilmek önemli olmakla birlikte hareket, bir görme sorununu da beraberinde getirir: Hareket halindeki nesnelerin özelliklerini açık bir şekilde görmek zordur. Bir nesnenin imgesi görsel haritanızda hareket etmeyi sürdürürse, nöronların her biri nesneyi ancak bir anlığına görür. Foveadaki fotoreseptörler nesnenin yüksek çözünürlüklü bir görüntüsünü oluşturmak için çok fırsat bulamayacaktır.

Bu sorunu çözmek için *düz takip* adı verilen özel bir göz hareketinden yararlanırız. Düz takip sırasında gözlerimiz, hareket eden he-

defin yönünde ve hızında (düz bir şekilde) hareket eder. Bu takip amaçlı göz hareketleri retinayı hedef gibi hareket ettirerek hedefin imgesinin konumunun retina üzerine sabitlenmesini sağlar. Beynin görsel haritasının ilgili yerlerindeki nöronlar bu sayede bu imgeyi daha uzun sürede, takibi sürdürdüğünüz sürece değerlendirme şansını elde eder.

Gözün düz takip hareketlerinin ilginç tarafı şu ki, hareket eden bir şeyi izlemediğiniz sürece gözlerinizi böyle akıcı bir şekilde hareket ettiremezsiniz. Bunu denerseniz, gözleriniz doğal olarak bir yerden bir yere hızlı ve kesik kesik hareket edecektir. Bunlar 3. Bölüm'de sözünü ettiğimiz sekmelerdir (bu konuya 6. Bölüm'de tekrar döneceğiz). Bunu bir partnerle birlikte deneyebilir ve bu olayı onun göz hareketlerine bakarak bizzat gözlemleyebilirsiniz. Partnerinizle karşılıklı oturun ve parmağınızı partnerinizin gözlerinin önünde sağa ve sola gezdirin. Partnerinize parmağınızı izlemesini söyleyin. Partnerinizin gözlerinin akıcı biçimde kayarak parmağınızı takip ettiğini göreceksiniz. Sonra parmağınızı indirin ve ondan gözlerini aynı şekilde hareket ettirmesini isteyin. Bu sefer göz hareketlerinin kesik kesik gerçekleştiğini, gözlerinin hareket ederken kıpırdadığını göreceksiniz.

Düz takip aynı zamanda hedef ne çok hızlı ne de çok yavaş, belli bir hızda hareket ediyorsa işe yarar. Göz hareketi hızları gözün hareket eksenindeki açısal rotasyonuna karşılık gelen saniye/derece ölçeğine göre belirlenir. Mümkün olan en yavaş düz takip hızı yaklaşık saniyede 1 ila 2 derece gibi görünüyor. Saniyede 2 derecelik hız yaklaşık olarak, kol mesafesinden baktığınızda başparmağınızın iki katı genişliğinde bir uzaklığın bir saniyede aşılmasına karşılık gelir. Düz takip hareketi saniyede 30 derecenin üzerinde bozulmaya başlar. Bunun üzerindeki hızlardaki düz takiplerde, hareket halindeki hedef yakalanamıyor gibi görünüyor. Örneğin Serena Williams'ın maçını yöneten bir hakem, topun saatte 193 kilometre hızla gitmesini sağlayan bir servisi düz göz hareketiyle doğru dürüst takip edemez. Hakemin on bir metre uzakta olduğunu farz edersek, top hakemin gözlerinin konumuna göre saniyede yaklaşık 80 derece yol alacaktır. Arthur Ashe Stadyumu'nun üst sıralarında, yani toptan yaklaşık 90 metre uzakta oturan seyirciler ise daha avantajlı olacaktır:

Bu mesafede servis hızı, saniyede yaklaşık 30 derece gibi takibe daha elverişli bir seviyeye düşer.

Buraya kadar, hareket algısının ve davranışların çeşitli veçhelerinden ve beynimizin bu tür algı becerilerini nasıl geliştirdiğine dair bir "teori"den söz ettim. Bütün ayrıntılar bilinmemekle birlikte, beynimizin hareketi görmesini sağlayan ve düz takip hareketine yardımcı olan özel bir sinir yoluna sahip olduğunu biliyoruz. Bu yol, yukarıda tarif ettiğimiz farklı yer ve zamanlarda görülen şeyleri kıyaslama işlemini yapacak donanıma sahip bir tür devreden oluşuyor muhtemelen. Bu kuramsal devrelerin, görsel kortekste bulunan ve beynin fiziksel olarak ortasında yer aldığı için orta temporal alan (MT) adıyla bilinen bir bölgede gerçekleştiği anlaşılıyor.

MT alanındaki nöronlar hareket eden uyaranlara sabit uyaranlardan daha güçlü tepki verirler. Bir şey hareket ettiğinde MT nöronları harekete geçerek birçok eylem potansiyelini ateşler, ama sabit olan şeylere karşı çok daha tepkisizdirler. Görme yolundaki diğer alanlar gibi MT nöronlarının da bir uyaranın yeriyle ilgili seçicilikleri alıcı alanlarıyla gerçekleşir. Ama MT nöronlarının alıcı alanları yalnızca konumu içermez, hareket halindeki uyaranın *hızını* da içerir. Belli bir konumu "görme" kapasiteleri sınırlı olsa da (diğer görsel nöronlar gibi) MT nöronları o konumdaki yönü ve hızı tespit edebilir. Bazı nöronlar sağa veya sola, bazıları yukarıya veya aşağıya, bazıları da çapraz hareket eden uyaranlara tepki verir. Bunun dışında, uyaran uygun bir hızda hareket ediyor olmalıdır. Yani bir nöron yalnızca on derece sağda bulunan ve yukarı doğru saniyede on beş derece hızla hareket eden bir uyarana tepki gösteriyor olabilir: Bu konum ve hız tercihini, o nöronun kendine özgü devre sistemi oluşturur. Bütün konum, yön ve hız kombinasyonları (veya hareket olarak görülebilen her şey) bu beyin bölgesindeki nöron popülasyonunun farklı üyeleri tarafından tek tek işlemden geçiriliyor gibi görünüyor.

Peki nöronların bazı görsel özelliklere olan yatkınlığı (MT'nin hareket tercihi gibi) bu nöronların o özellikleri görme biçimimizden sorumlu olduğunun mutlak bir kanıtı sayılır mı? MT, beyinde nöronların harekete karşı bir yatkınlık gösterdiği tek yer değildir ve MT nöronları hareketin yanı sıra nesnelerin dış özelliklerine karşı da hassasiyet gösterir. Dolayısıyla, nöral aktivite ile algı arasında

nedensel bir bağ olduğuna dair ek kanıt gerekiyor. Bu tür kanıtlar bazen beyni hasara uğramış hastalardan elde edilebiliyor.

MT'nin hasar görmesi tuhaf bir körlüğe, *akinetopsia* adı verilen hareket algılama yetersizliğine neden olur. İnsanlarda yalnızca kortikal bölgeyi etkileyen lezyonlara sık rastlanmaz, bu nedenle akinetopsia vakası çok enderdir. Bu rahatsızlıktan mustarip olan insanlar görebilirler ama nesnelerin hareket edip etmediğini, ediyorlarsa hangi yönde ve ne hızda hareket ettiklerini anlayamazlar. Adının baş harflerinden oluşan LM kısaltmasıyla tanınan bir hastanın 1978'de kırk üç yaşındayken damarlarından birinde pıhtı oluşmuş ve pıhtı MT bölgesini besleyen damarı tıkamış. O yıldan bu yana bilim insanları onun görme yeteneklerini kapsamlı olarak araştırmaya devam ediyorlar.[7] LM sabit imgeleri görebiliyor: Kendisine gösterilen nesnelerin adlarını hatasız söyleyebiliyor ve renkleri mükemmel biçimde ayırt edebiliyor. Ama uyaranların hareket edip etmediğini fark edemiyor. Çoğu insan kendi parmaklarının hareketini gözleriyle takip edebilir ve bunu gözleri kapalı haldeyken veya karanlıkta değil, parmaklarını gördüğünde daha iyi yapabilir. LM'ye ise parmaklarını görmek fayda etmiyor; parmaklarını karanlıkta da aydınlıkta da takip edemiyor. Hareket eden nesneler ona bir yerdeyken sonra başka bir yerde ortaya çıkmış gibi görünüyor, aradaki hareketi görmüyor. Bir bardağa taşırmadan su koymak onun için çok zor. Yolda karşıdan karşıya geçmek onun için tehlikeli, çünkü arabaların yaklaşıp yaklaşmadıklarını ve ne hızda yaklaştıklarını anlayamıyor. Bu eksikliğini körlerin yaptığı gibi, sesten yararlanarak telafi etmeye çalışıyor.

Hayvanlar üzerinde yapılan araştırmalar MT bölgesindeki hasarın özellikle hareket görüşünü sakatladığını doğruluyor. Hayvanlarda, küçük miktarda toksik bir maddenin ilgili bölgeye enjekte edilmesiyle veya ilgili bölgedeki küçük bir dokunun elektrot yardımıyla yakılması sonucu bu tür lezyonlar oluşturmak mümkün. Beynin yalnızca küçük bir alanıyla sınırlı tutulabildiği için bilinçli yaratılan bu tür lezyonlar araştırmalarda yararlı sonuçlar sağlıyor, MT hasarı olan insanlar ise genelde çok daha geniş bir alanı etkileyen bir inme veya beyin hasarı geçirmiş oluyorlar. (Bu tür araştırmalarda, hayvanın hareketi lezyondan sonra olduğu kadar *önce* de ne ölçüde algılayabil-

diği incelenebildiği için tam denetimli bir deney yapılabiliyor.) Hayvanlarda MT'deki küçük lezyonlar, *yalnızca* görsel sahnenin lezyonlu bölgedeki alıcı alanla örtüşen lokasyonunda hareket körlüğü yaratır; bu da algı bozukluğuna, lezyonun öldürdüğü hücrelerin kaybının yol açtığını doğrular.

HASAR, nöronların algıya nasıl katkıda bulunduğunu belirlemenin yollarından biridir (katkılarını ortadan kaldırınca algının nasıl etkilendiğini görürsünüz). Ya tam tersi olursa, yani gerçek dünyada hiçbir şey olmazken nöronlar faaliyete geçmeye zorlanırsa? Bunu yapmak da mümkündür. Nöronlar elektrikle uyarılarak eylem potansiyellerini ateşlemeleri sağlanabilir. Bir elektrot yardımıyla nöronlar hem dinlenebilir (elektrik sinyalleri alınıp büyütülebilir ve bilgisayara kaydedilerek analiz edilebilir) hem de normalde yaptıklarından farklı bir şey yapmaları sağlanabilir. Elektrotla verilen akım titreşimleri, elektrotun ucuna yakın nöronların aktif hale geçmelerini sağlayabilir. Akım titreşimleri nöronların normal sinaptik araçlarla girdi alıyormuş gibi tepki vermelerini sağlayabilir.

Elektriksel uyarılar ilk dönemlerde bilimsel ve tedavi amaçlı olarak insan beyninde kullanılmıştır. Sinir cerrahı Wilder Penfield (bu bölümde daha önce vücut haritaları konusunda adı geçmişti) yirminci yüzyılın ortalarında epilepsi ameliyatları sırasında insan beyninde elektriksel uyarının kullanımına öncülük etmiştir.

Epilepside kontrolden çıkmış nöral aktivitelere rastlanır. Bir epilepsi nöbetinin en yoğun ânında nöronlar kendiliğinden ve aşırı ateşlemeler yaparlar; faaliyetleri beynin diğer bölgelerine de yayılır, nöral işlemleri sabote eder ve nöbet sırasında normal duyumu, hareketi ve düşünme faaliyetlerini engeller. Günümüzde birçok epilepsi vakası bu kontrolden çıkmış nöral aktiviteyi engelleyen ilaçlarla tedavi edilebiliyor. Ama bu ilaçlar geliştirilmeden önce tek tedavi yöntemi, bu nöbetlerin beynin hangi bölgesinde başladığını bulmak ve bu nöbetlere neden olan nöronları yok etmekti; ilaçların tedavi edemediği bazı epilepsi vakalarında aynı yöntem günümüzde de uygulanıyor.

Sinir cerrahları genelde yalnızca zincirleme tepkimeyi başlatan nöronları ve mümkün olduğunca az sayıda nöronu yok ederler. Ama cerrahlar, hangi bölümün yok edilmesi gerektiğini, hangisine do-

kunmamaları gerektiğini beyin dokusuna bakarak anlayamazlar. Cerrah kafatasını açıp beyne baktığında, beyin dokusu normal bir beynin dokusu gibi görünür: Bej renklidir, kan damarları nedeniyle pembeye çalar. Bazı beyin yapıları, korteks dokusunun karakteristik kıvrımlı şekli gibi belirgin işaretler baz alındığında nispeten tutarlı konumlar işgal eder. Ama bu işaretler ancak cerrah kafatasında daha büyük alanlar açtığında görünür. Günümüzde MRI ve CT taramaları, cerrahların beynin tamamını cerrahi müdahalede bulunmadan görmelerini sağlıyor, ama 1930'larda ve 40'larda bu mümkün değildi.

Penfield, beynin farklı bölgelerindeki nöronların elektrik uyaranlarıyla uyarılmasını içeren bir beyin haritalama yöntemi geliştirmişti. Bu işlemin yapılabilmesi için hastanın ameliyat sırasında uyanık olması gerekir ki uyarılma sonucunda ne deneyimlediğini aktarabilsin. Neyse ki beyin ameliyatı diğer ameliyatlar gibi değildir. Beyinde 85 milyar kadar nöron bulunmasına rağmen[8] bu nöronlar, kendi yakın çevrelerinde neler olduğu bilgisini değil, vücudun başka yerlerinde neler olduğu bilgisini aktarırlar; beynin kendisinde ağrı sensörleri yoktur. Bu nedenle, kafatasının kesilip açılması sırasında duyulacak acıyı önlemek için yalnızca lokal anestezi uygulanır ama hasta uyutulmaz. Beyne bir elektrot batırılır, hasta bunu hissetmez. Elektrota küçük miktarlarda elektrik akımı verildiğinde, elektrotun ucunun yakınındaki nöronlar aktif hale geçer. Akım arttıkça elektrotun aktive ettiği nöronların alanı da artar. Beyin alanına bağlı olarak, birkaç mikroamper kadar düşük elektrik akımları (kol saati pilinin sahip olduğu akımın yaklaşık binde biri) hastaların uyarılan dokunun işlevine uygun şeyler hissetmelerini sağlamaya yetecek sayıda nöronu aktive edebilir.

Penfield hastalarının beyinlerinin her yerini bu şekilde uyarıp onlara ne hissettiklerini sormuştu. Hastalar, elektrotun dokundurulduğu yere bağlı olarak çeşitli duyumlar (görüntüler, sesler, dokunuşlar) bildirmişlerdi. Penfield somatosensori korteksi uyardığında, hasta vücut yüzeyinin belli bir bölgesinde bir şeyler hissediyordu. Elektrotu biraz kaydırıp farklı bir yere götürdüğündeyse, hasta vücudunun yakın bir yerinde bir şeyler hissetmeye başlıyordu. Penfield bu şekilde vücut yüzeyinin somatosensori korteksinde ve yakınındaki kortekste nasıl temsil edildiğini gösteren ayrıntılı haritalar

çıkardı; bu haritalar bugün de kullanılıyor (Şekil 4.8).

Penfield MT bölgesini uyarmamış ya da uyardıysa bile bu konuda pek bir şey söylememiştir. Ama MT bölgesinin hareket seçiciliğini ve bu bölgenin hasara uğraması sonucu hareket algısında meydana gelen bozuklukları göz önünde bulundurduğumuzda, bir kişinin MT'deki nöronlarını aktive etmenin, ortada herhangi bir hareket olmamasına rağmen o kişinin bir hareket "görmesini" sağlayacağını bekleyebiliriz.

Birkaç yıl önce, maymunlarda bu olasılığı araştırmak üzere Richard Born ve William Newsome ile birlikte çalıştım. Maymunların beyni insan beynine çok benzer. İnsanlardaki kortikal bölgeler çoğunlukla maymunlarda da bulunur ve lokasyonları da aynıdır; bu durumun tersi de geçerlidir. Bir maymunun beyniyle ilgili bir şey keşfettiğinizde, bu keşfinizin aynı işlemin insanın beyninde nasıl gerçekleştiğine dair bilgilendirici olması kuvvetle muhtemeldir (dil gibi insanlarda olan ama maymunlarda olmayan yetenekler hariç elbette).

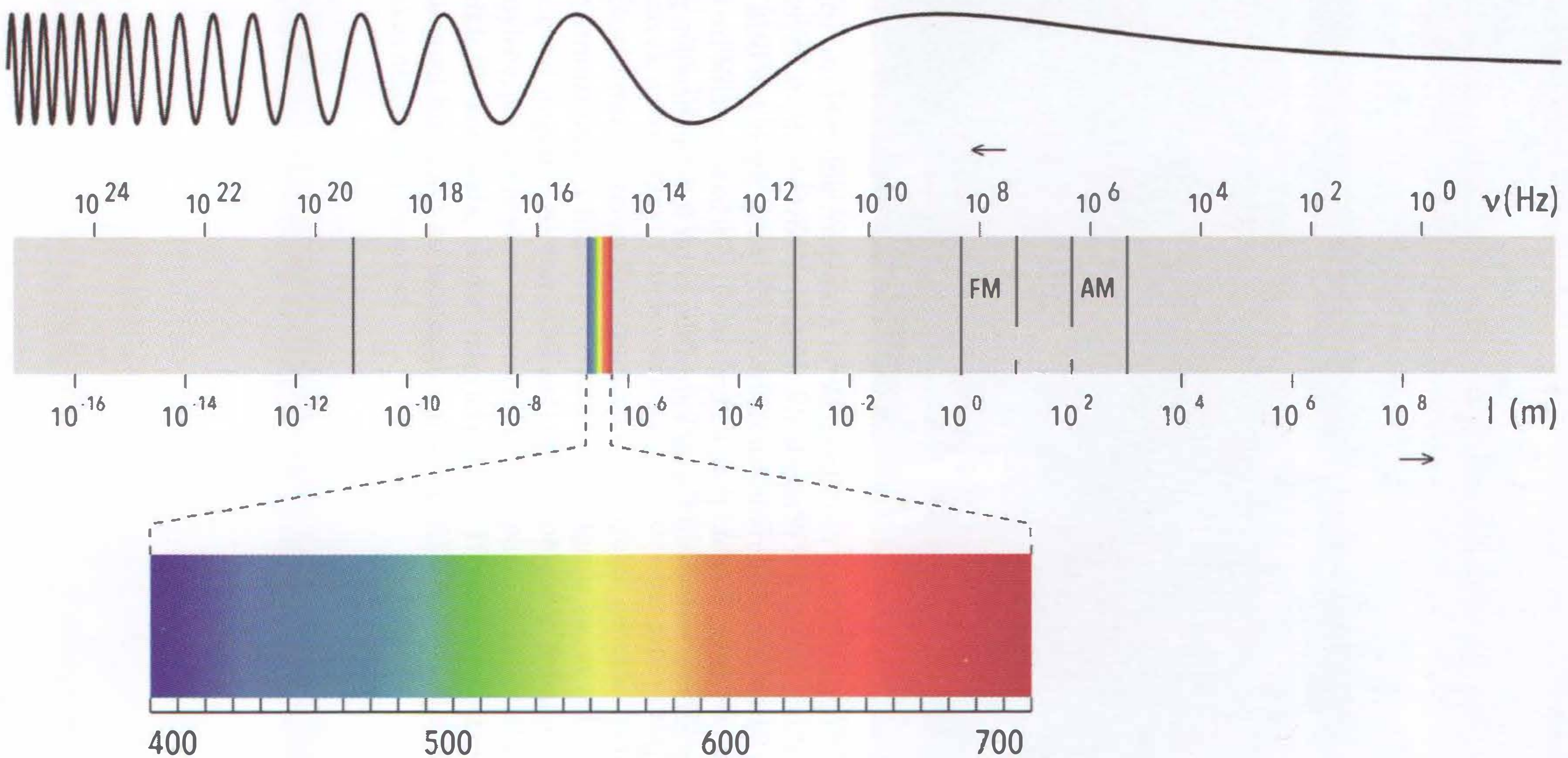
Maymunlar da belli köpek cinsleri gibi görsel işleri yapacak şekilde kolayca eğitilebilirler. Birçok maymuna, görsel uyaranları düz göz hareketleriyle takip etmeyi öğrettik. Maymunlar bu hareketi öğrendikten sonra MT kortikal bölgelerini uyardık. Bu deneyden birçok şey öğrenmeyi amaçlıyorduk: Maymunlar MT uyarılırken bir hareket görmüş gibi mi davranacak? Öyle davranırlarsa, hareketin yönü ve hızı, aktive olan hücrelerin normalde kendi kendilerine ateşlendiklerinde tercih ettikleri yön ve hıza karşılık gelecek mi'?[9]

MT bölgeleri uyarıldığında maymunların hareket algıladıklarını rahatlıkla söyleyebiliriz, çünkü gerçek hedef hareket etmediği halde bazen düz göz takibi yapmaktaydılar, ki daha önce de gördüğümüz gibi, normalde bu göz hareketini ortada uyaran olmadan yapmak mümkün değildir. Göz takip hareketlerinin yönü de uyardığımız nöronların tercih ettiği yönle örtüşüyordu; nedensel bir bağlantıya dair kanıta tahminimizden fazla yaklaşmış ve maymunlara farklı görevler verildiğinde elde edilen önceki bulgulara benzer bulgular elde etmiştik.[10]

Özetle, bütün işaretler MT ile hareket seçiciliği arasında yakın bir ilişki olduğunu gösteriyor. MT nöronları harekete karşı oldukça

seçicidir. Bu nöronlar hasar gördüğünde hareket algısı bozulur. Keza, bu nöronlar yapay olarak aktive edildiklerinde, ortada hareket olmadığı halde varmış gibi "görülür". Ama MT'nin çok istisnai bir durum oluşturduğunu unutmayalım; zira çoğu beyin bölgesi, tepki özelliği ve algı niteliği hakkında, bu nedensel zihin-beyin ilişkisini güçlendirecek, gerek lezyonlardan gerekse uyarma deneylerinden elde edilmiş somut bir kanıt yok elimizde. Örneğin bu bölümün başlarında sözünü ettiğimiz, sınır sahipliği hassasiyeti olan nöronların nesnelerin sınırlarını tanımlama işlemine doğrudan katılıp katılmadıklarını veya bugüne kadar üzerinde düşünmediğimiz farklı şeyler yapıp yapmadıklarını bilmiyoruz. Bu noktaya (ve muhtemel bir açıklamaya) 10. Bölüm'de değineceğim.

Ama önce mekân gezimize devam edelim, çünkü beyin haritaları hikâyenin tamamı değil. Beyin haritaları, görme veya dokunma duyusundan bilgi (duyu organı içindeki bir haritaya dayanan bilgi) geldiğinde devreye girer. Peki ya beyin böyle düzenli girdi sinyallerine erişemediğinde ne olur? Duyma ve harekette beyin tam da bu durumla karşı karşıya kalır – az sonra.



Resim 1 Elektromanyetik radyasyon çevremizi kuşatmış durumdadır ama insan gözü bunun yalnızca bir kısmını görebilir. 400 ile 700 nanometre arasındaki elektromanyetik radyasyonu görebilir ve ışık olarak adlandırırız.



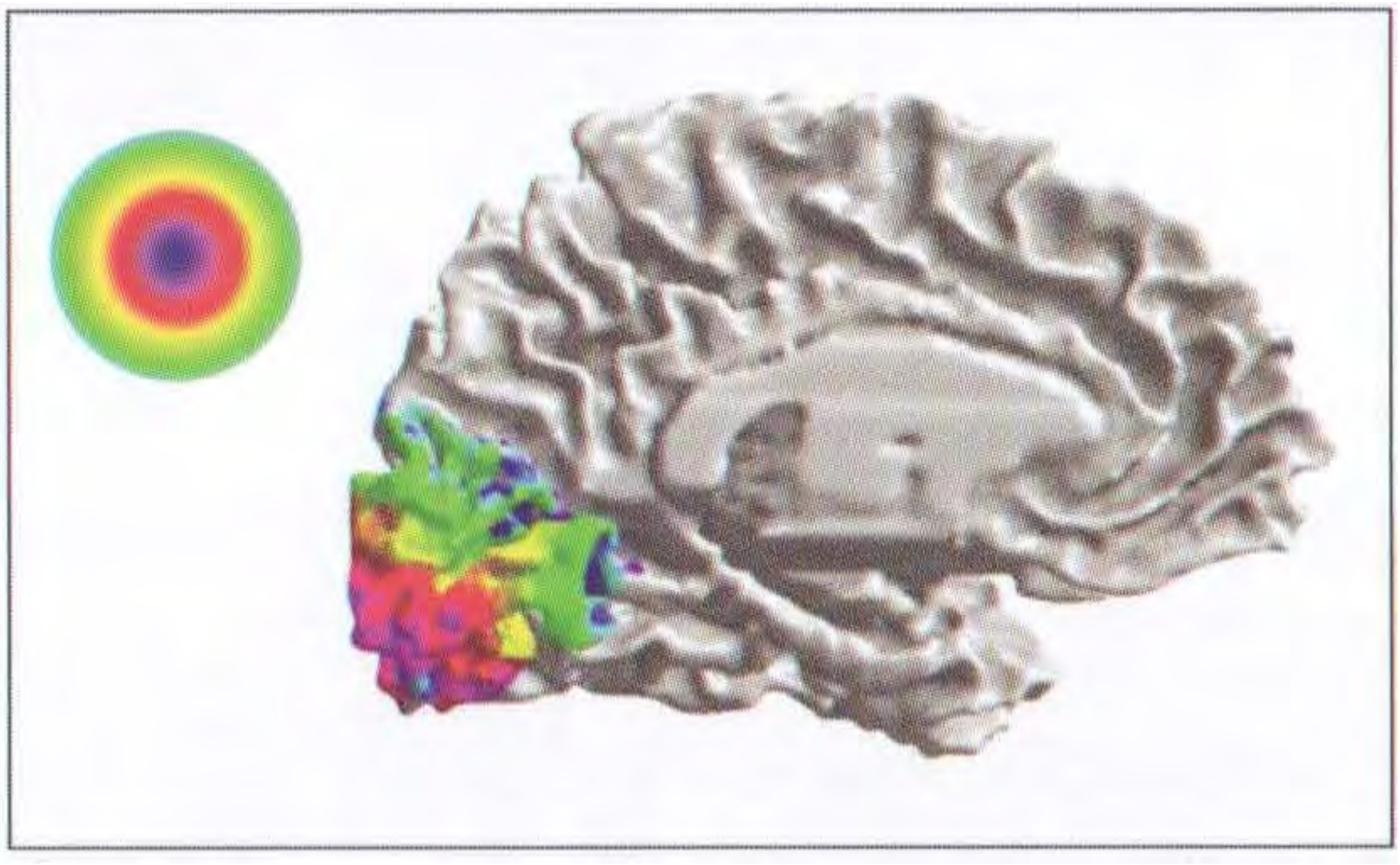
Resim 2 Pierre-Auguste Renoir'nın *Denizcilerin Kahvaltısı* adlı tablosu, ışığın nasıl diz hatlar halinde ama çeşitli yönlerde yol aldığını ve böylece birçok kaynağa ait ışıkların nasıl karıştığını gösteriyor. Bu sahnede ışık, şarap şişesi gibi belli bir yerden yansıyarak yayılıyor. Soldaki genç kadının omzu gibi bazı yerlerde ise ışık birçok kaynaktan gelerek birleşiyor. Bu tür karışımlarda bir fotonun nereden geldiği nasıl anlaşılır?



Resim 3 Madison'daki (Wisconsin) hükümet binasının fotoğrafı. Fotoğrafa soldaki merceği kırmızı, sağdaki merceği mavi olan bir gözlükle bakıldığında, hükümet binasının önündeki heykel öne fırlamış gibi görünür. Mavi mercek mavi imgeyi filtreleyerek yalnızca kırmızı imgenin, kırmızı mercek de kırmızı imgeyi filtreleyerek yalnızca mavi imgenin görünmesini sağlar. Böylece, her göz heykeli retinada biraz farklı bir konumda, heykel izleyiciye hükümet binasının kubbesinden daha yakın olacak şekilde görür.



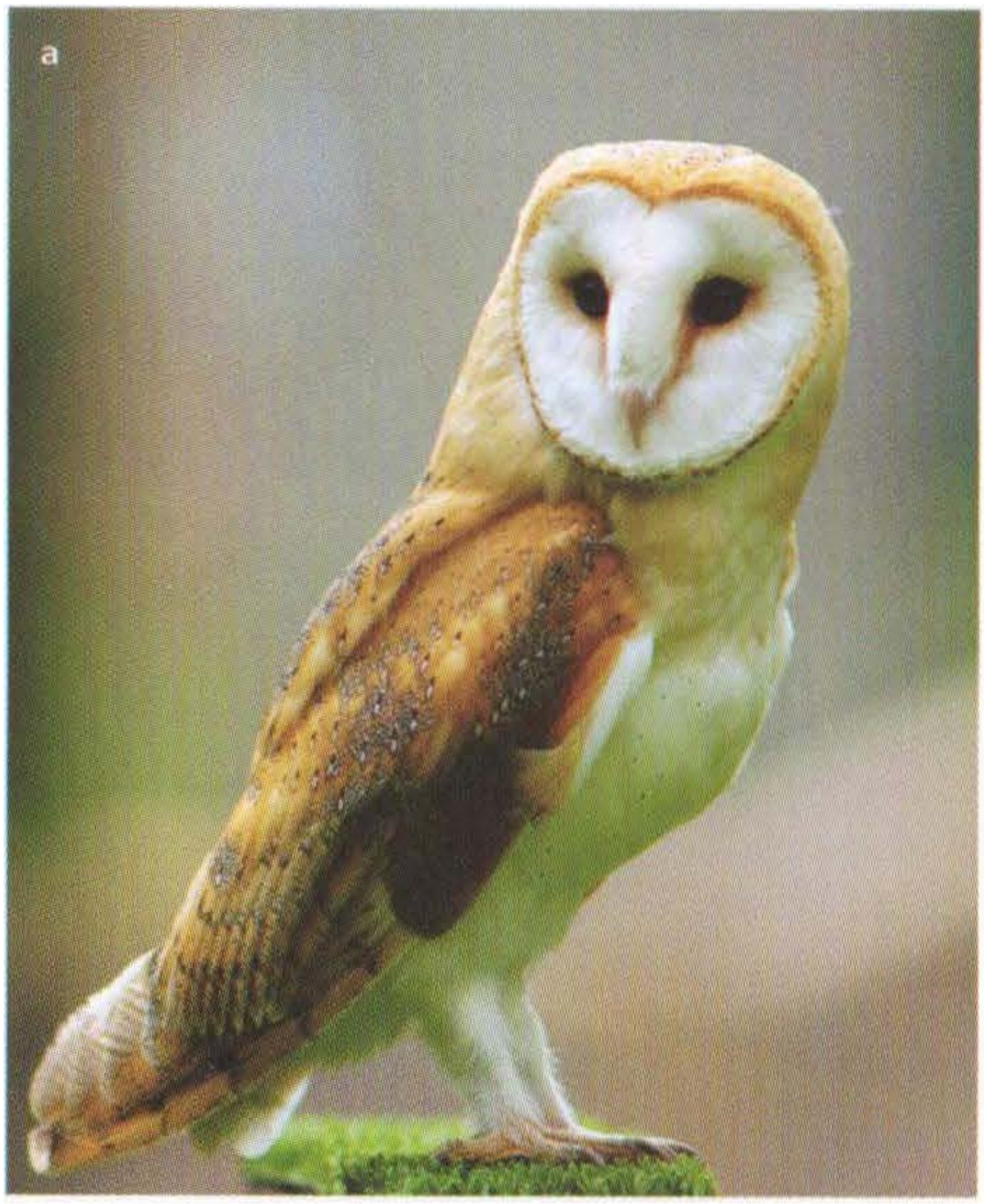
Resim 4 *Le Blanc-Seing* (Açık Çek) adlı bu tabloda René Magritte, görsel ipuçlarını birbirleriyle rekabet ettirerek bize tuhaf, olanaksız bir üç boyutlu sahne duygusu yaşatır. Normalde bir nesne diğerini gizlediğinde, gizleyen nesneyi öndeymiş gibi görürüz. Puslu, belirsiz imgeler genelde daha uzakta yer alır. Magritte ise, at ve binici gibi ön plandaki objelerin önünü kısmen arka plandaki puslu bitki örtüsüyle kapatır. © 2013 C. Herscovici / Artists Rights Society (ARS), New York.

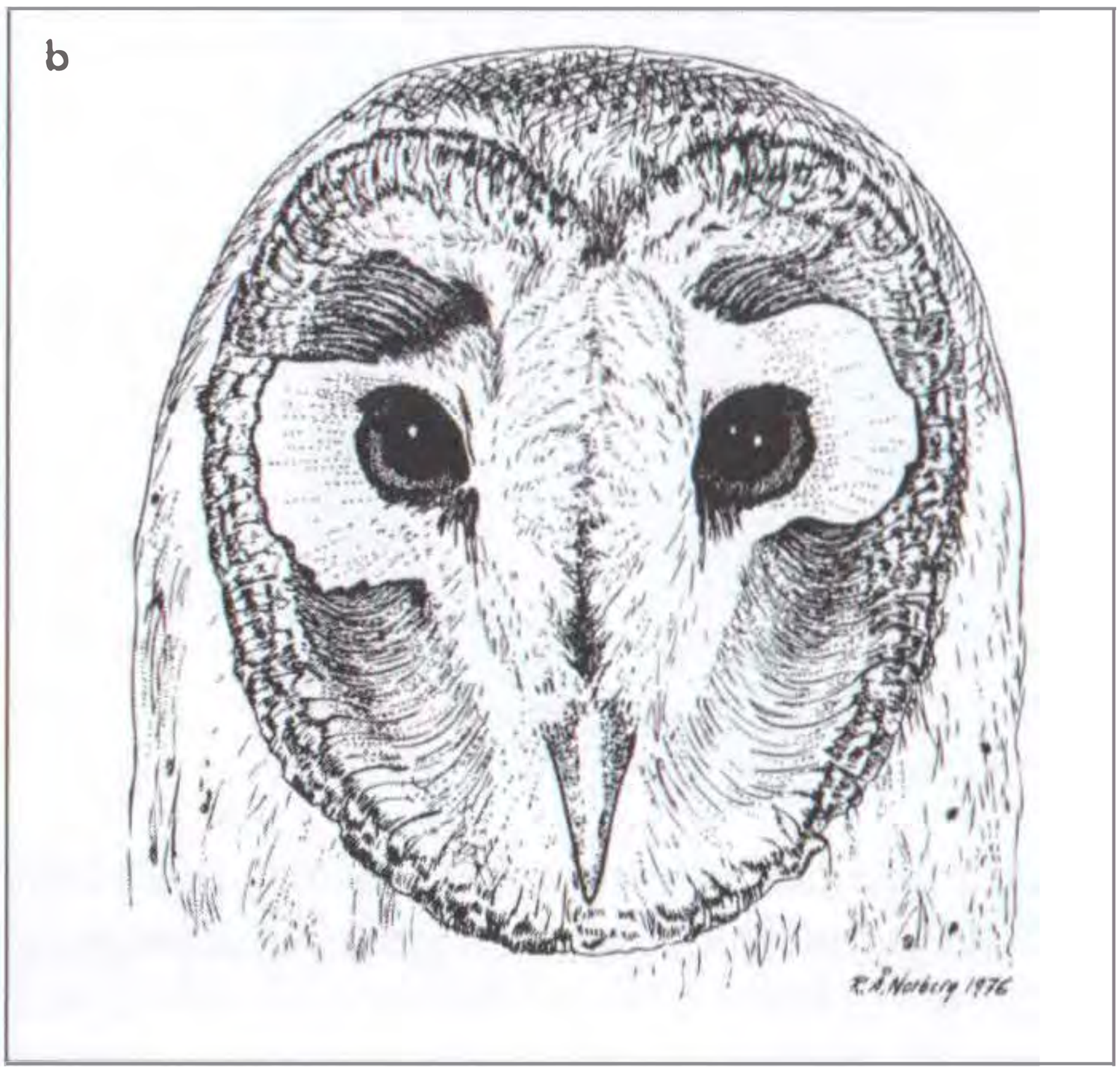


Resim 5 Beynin görsel mekân haritası. Görsel sahnedeki mekânsal ilişkiler, retinada oluşan düzenli bağlantılar sayesinde korunur. Resimdeki renkli hedef tahtası görsel sahneyi temsil ediyor, beyindeki renkli katmanlar ise hangi nöronların görsel sahnedeki renkli bölgelere karşı hassas olduğunu gösteriyor. Burada yalnızca primer görsel korteksin haritası gösterilmiştir, farklı görsel korteks alanlarında bunun gibi birçok harita vardır.

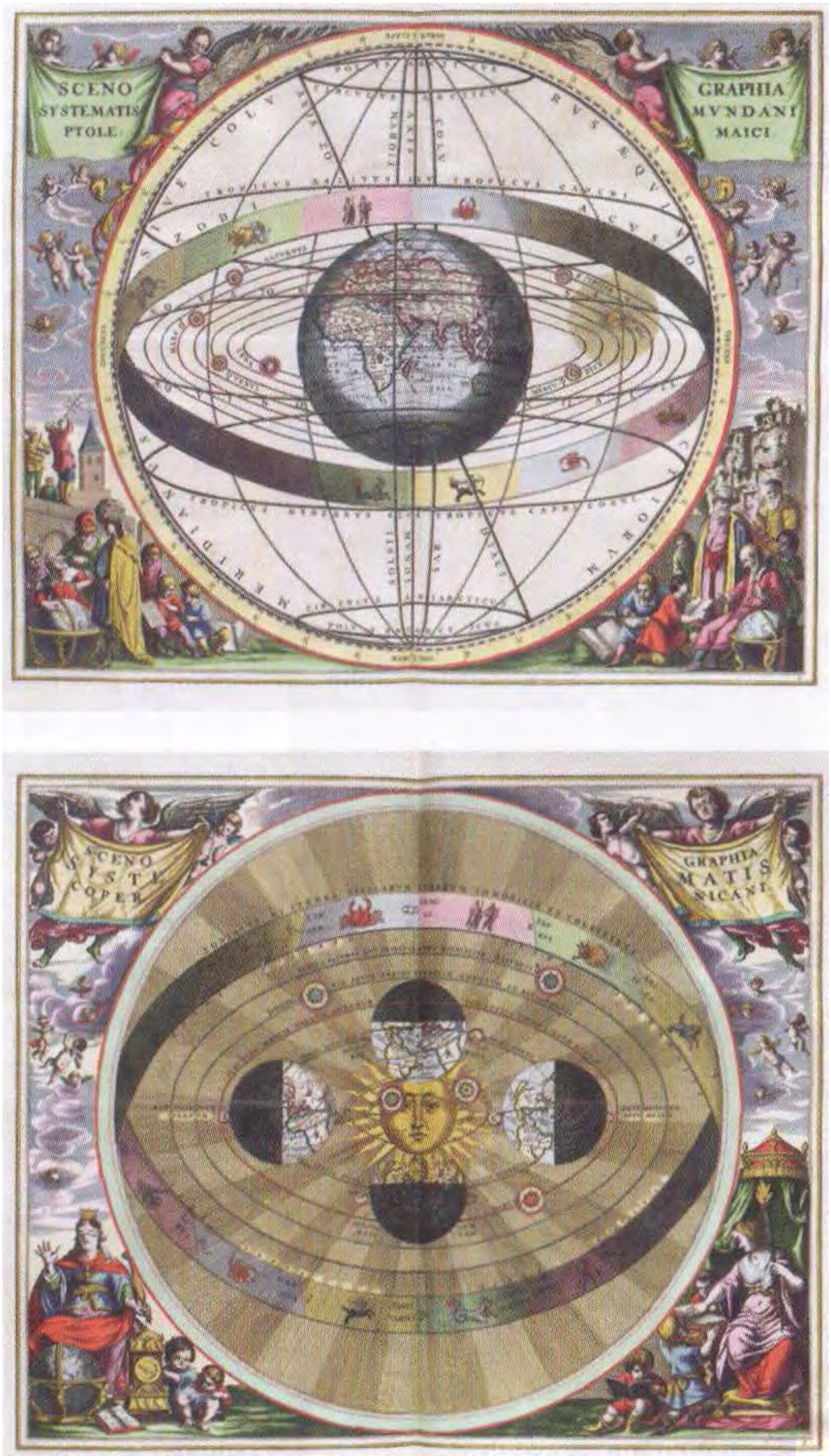


Resim 6 Motosikletçi farklı anlarda farklı konumlardadır. Bu hareketi algılamak için beyin görsel sahnenin farklı anlardaki durumlarını birbiriyle kıyaslar, bir imgeye tepki olarak ortaya çıkan nöral aktiviteyi geciktirir, onu daha sonraki (gerçek zamanlı) bir imgeye verilen tepkiyle oluşan nöral aktiviteyle birlikte yeniden oluşturur.



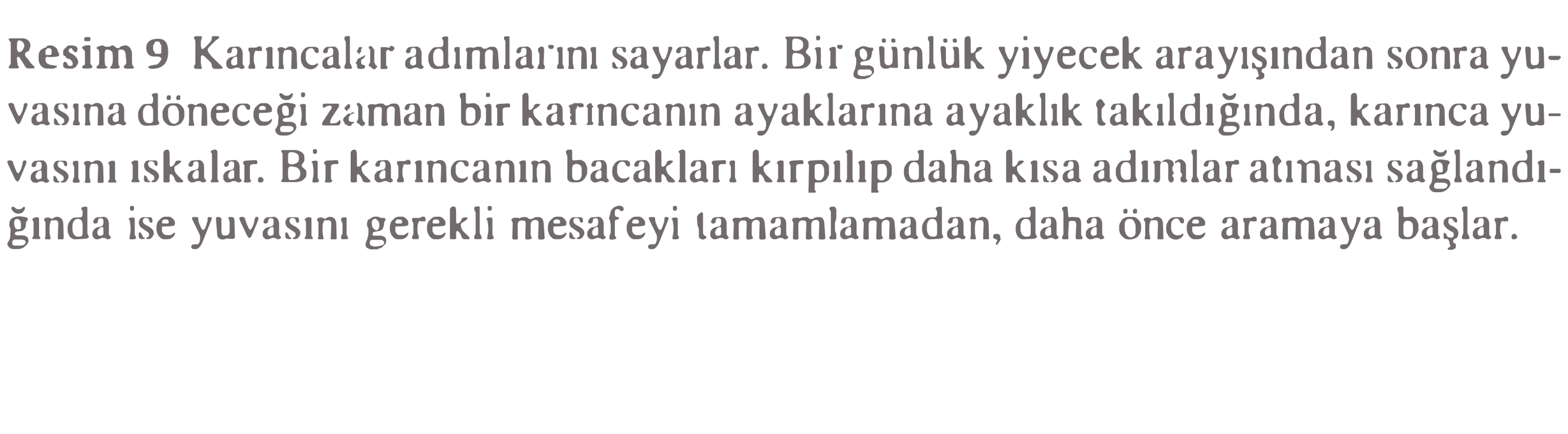


Resim 7 Peçeli baykuşlar seslerin nereden geldiğini belirleme konusunda insanlardan daha başarılıdır. Bu beceriye hayatta kalmak için ihtiyaçları vardır, çünkü avlarını karanlıkta avlarlar. Seslerin dikey konumlarını bizden daha iyi tespit ederler, çünkü sol ve sağ kulakları farklı yönlere, biri yukarı diğeri aşağı bakar. Bu durum iki kulakta bir ses yüksekliği farkı yaratır; bu ses yüksekliği farkı, sesin baykuşun ne kadar yukarısında veya aşağısında olduğuna bağlı olarak değişiklik gösterir. Peçeli baykuş bu bilgiyi, sesin yatay düzlemde nerede olduğuna bağlı olarak değişiklik gösteren zamanlama farklılıklarıyla birleştirerek sesin mekân içindeki konumunun yatay ve dikey bileşenlerini tam olarak saptayabilir. Bazı tüylerinden arındırılarak çizilmiş olan aşağıdaki baykuş resminde (*b*), kulaklardaki asimetri görülüyor.

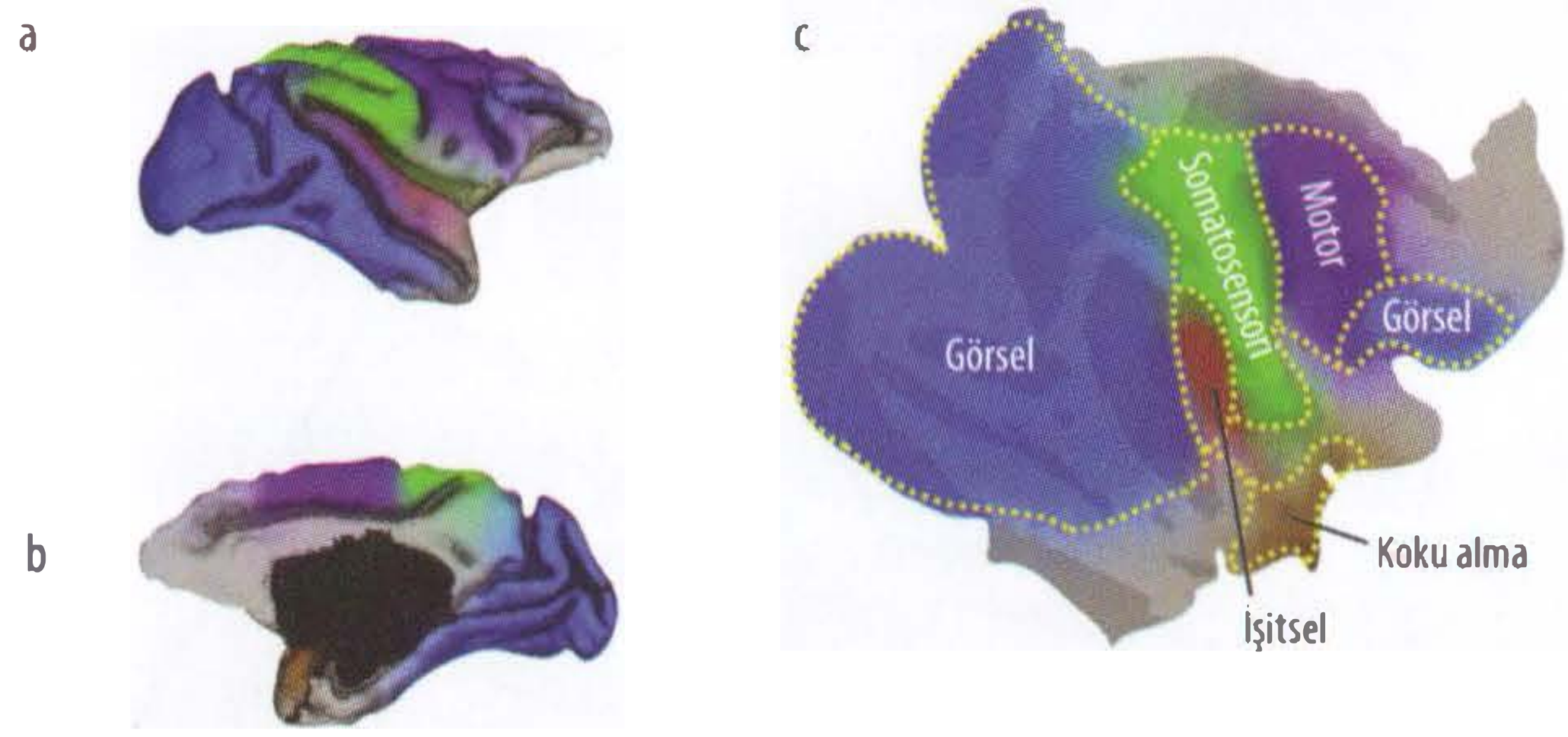


Resim 8 İlk gökbilimciler evrenin merkezinin dünya mı yoksa güneş mi olduğu konusunda kararsız kalmışlardı. Üstteki çizim, Batlamyus'un güneş ve diğer gezegenlerin dünyanın etrafında döndüğü fikrini temsil ediyor. Alttaki çizimdeyse Kopernik'in güneşi merkeze alan görüşü temsil ediliyor. Benzer şekilde, beynin farklı duyu bilgisi türleri için kullandığı referans çerçevelerinde de farklı merkezler söz konusudur. Göz görsel referans çerçevesinin merkezidir, ama iki kulağın oluşturduğu eksen işitsel referans çerçevesinin merkezi görevini görür, vücut ise dokunma ve hareketin referans çerçevesinin merkezini oluşturur. Beyin gördüğü, duyduğu veya hissettiği şeyleri kıyaslayacağı zaman, aldığı sinyalleri ortak bir çerçeveye dönüştürmek zorundadır. Bu dönüştürme işleminin ise esnek olması ve özgün referans çerçeveleri arasındaki oynak ilişkiler hesaba katılarak yapılması gerekir.

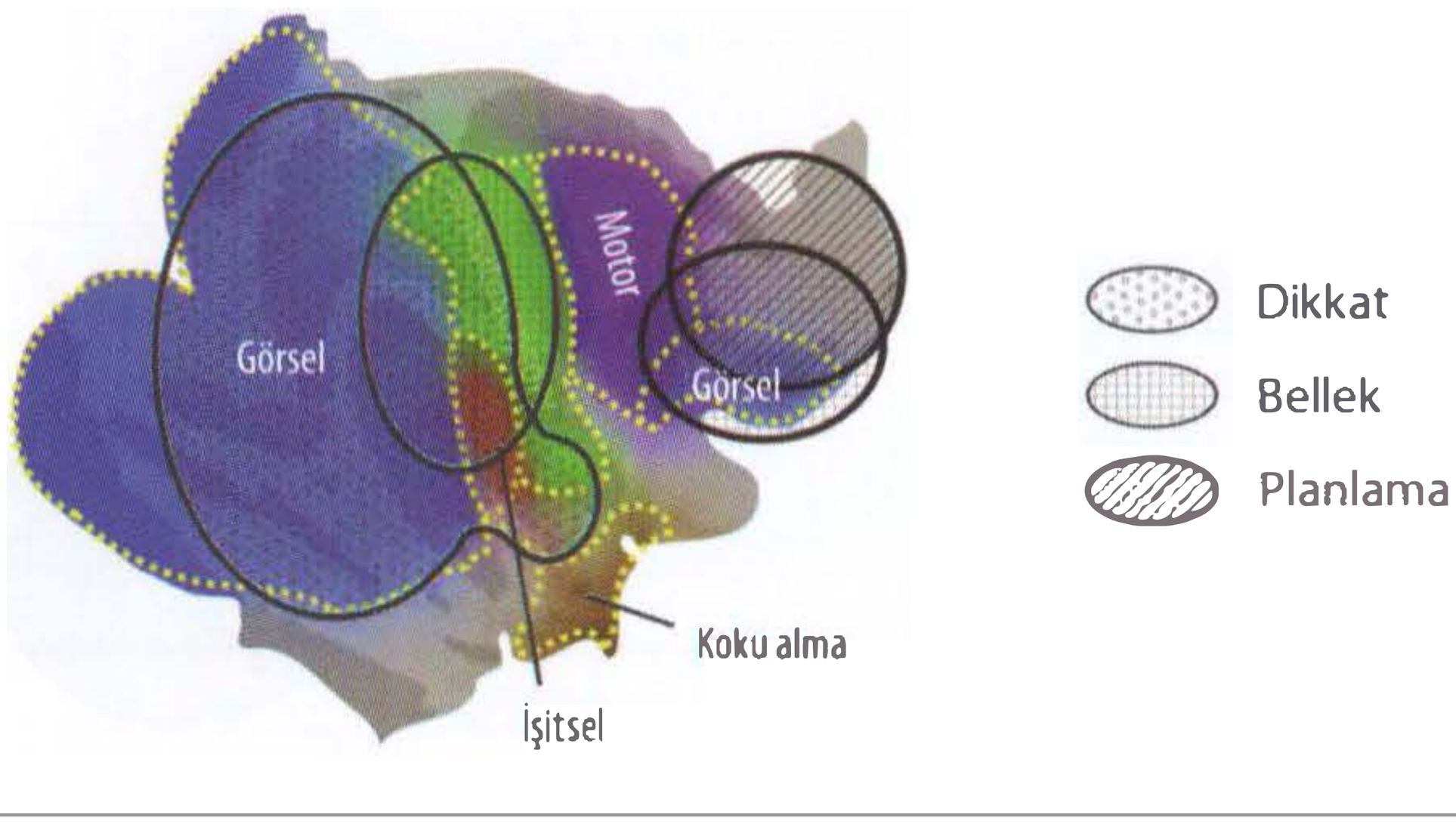
Resim 9 Karıncalar adımlarını sayarlar. Bir günlük yiyecek arayışından sonra yuvasına döneceği zaman bir karıncanın ayaklarına ayaklık takıldığında, karınca yuvasını ıskalar. Bir karıncanın bacakları kırpılıp daha kısa adımlar atması sağlandığında ise yuvasını gerekli mesafeyi tamamlamadan, daha önce aramaya başlar.



Resim 10 Hipokampusun çevresinde mekânsal navigasyonla ilişkili üç sinyal türü bulunur. Konum hücreleri (*a*) adıyla bilinen nöronlar, fare bulunduğu ortamda belli bir lokasyondayken tepki verir. Buradaki örnekte, fare yuvarlak bir hazne içinde sol alttayken aktivitenin yüksek seviyede olduğu görülüyor. Baş yönü nöronları (*b*) farenin yüzünü verdiği yöne karşı duyarlıdır; şekilde güneydoğu yönüne karşı duyarlı nöronlar şematik olarak gösterilmiştir. Izgara hücreleri (*c*) fare ortamda düzenli mekânsal aralıklarla hareket ettiğinde aktiftir. Farklı konum, baş yönü veya ızgara hücreleri sırasıyla farklı lokasyonları, yönleri veya mekânsal aralıkları (daha ince veya kalın tanecikli aralıkları) tercih ederler.



Resim 11 Beynin büyük bir kısmı belli bir duyu veya motor işlemi gerçekleştirir. Şekilde rhesus maymunlarının korteksinin yan (*a*) ve orta (*b*) bölümleri görülüyor; bu bölümlerin düzleştirilmiş olarak tasvir edildiği *c*'de ise her bölgede bulunan duyu veya motor aktiviteleri görülüyor. İnsanlarda tepki örüntüleri henüz tam olarak keşfedilmemiş daha birçok bölge bulunur.



Resim 12 Bellek, dikkat ve planlama üzerine yapılan araştırmalarda genelde, bu işlerde rol oynadığı düşünülen beyin bölgelerinin, duyusal ve motor aktiviteler gösteren beyin bölgeleriyle çakıştığı ortaya çıkmıştır.

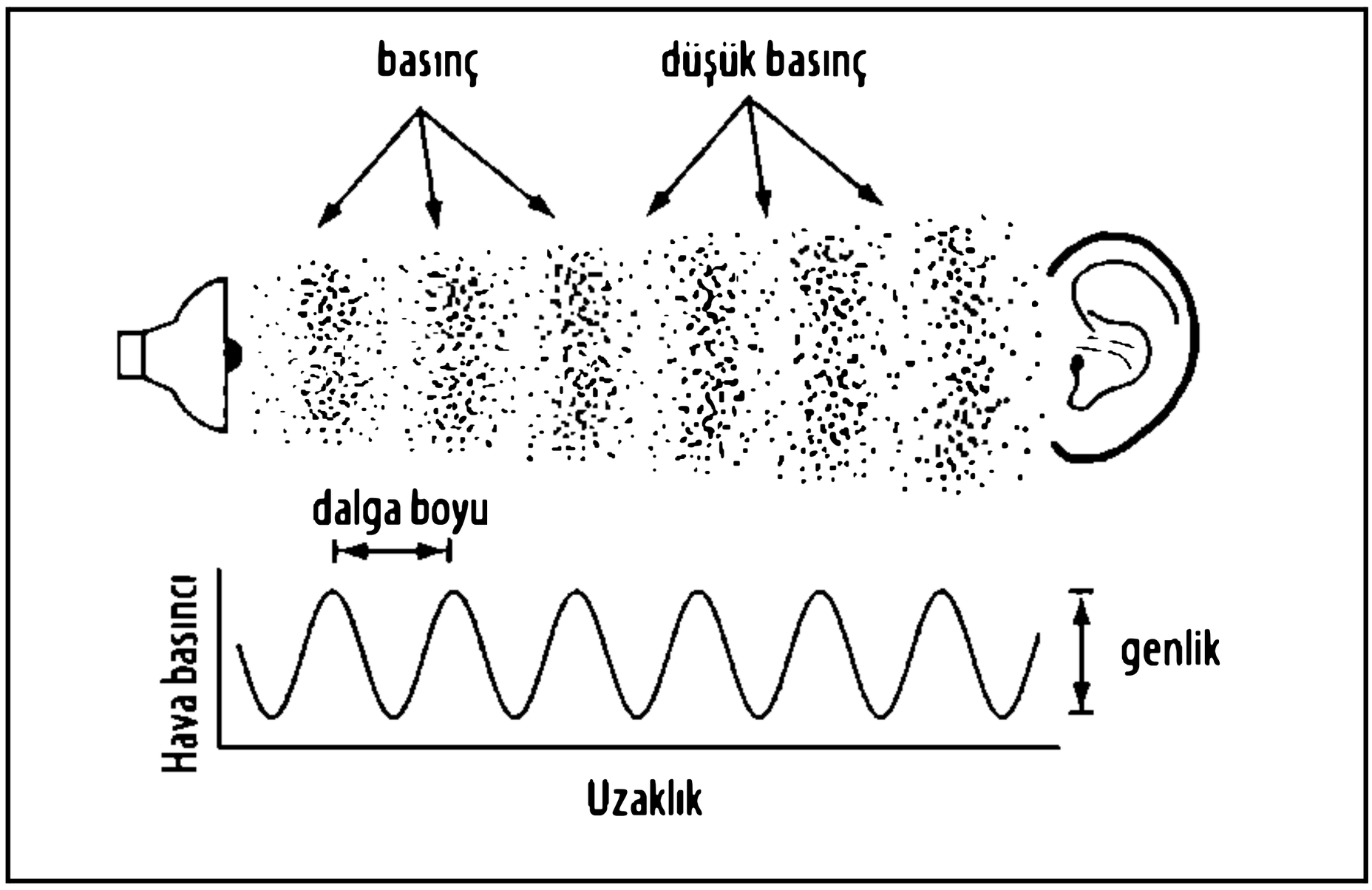
5

Sherlock Kulaklar

EVİNİZDE öten bir cırcırböceği aramışlığınız varsa, bir şeyleri yalnızca sesle bulmanın ne kadar zor olduğunu biliyorsunuz demektir. Benimse en nefret ettiğim şey, evimdeki pille çalışan duman dedektörü. Pil zayıfladığında dedektör insanı deli eden, kesik kesik tiz bir ses çıkarıyor. Her odada bir dedektör olduğu için, hangisinin ses çıkardığını anlamak şaşırtıcı derecede zor. Sesi kolayca tanıyabiliyorum ve sesin tavandaki beyaz plastik kutucuktan geldiğini biliyorum. Ama gözlerimi kapatıp sesin geldiği yönü belirlemeye çalıştığımda çok hata yapıyorum. Çoğunlukla doğru odayı bulduğumdan bile emin olamıyorum.

Bunun zor olmasının nedeni sesle, kulağın sesi ölçme biçimiyle ve beynin çevredeki kanıtlardan yararlanarak sesin yeri konusunda vardığı sonuçlarla ilgili. Kulağın neyi ölçtüğü sorusuyla başlayalım: Ses nedir ve beyinde nöral aktiviteyi nasıl başlatır?

SES, MOLEKÜLLERİN fiziksel ileri geri salınımlarını içeren mekanik bir olaydır (Şekil 5.1). Ses dalgalarını rüzgâra benzetebiliriz, ama ileri geri esen bir rüzgâr gibidir daha çok. Hava molekülleri normalde çok uzağa gitmez, rüzgârda ise çok uzak mesafeler katedebilirler. Moleküller komşu moleküllere çarpar, onlar da kendi komşularına vb. Ses dalgaları ayrıca rüzgârdan daha hızlıdır (saatte yaklaşık 1200 km).

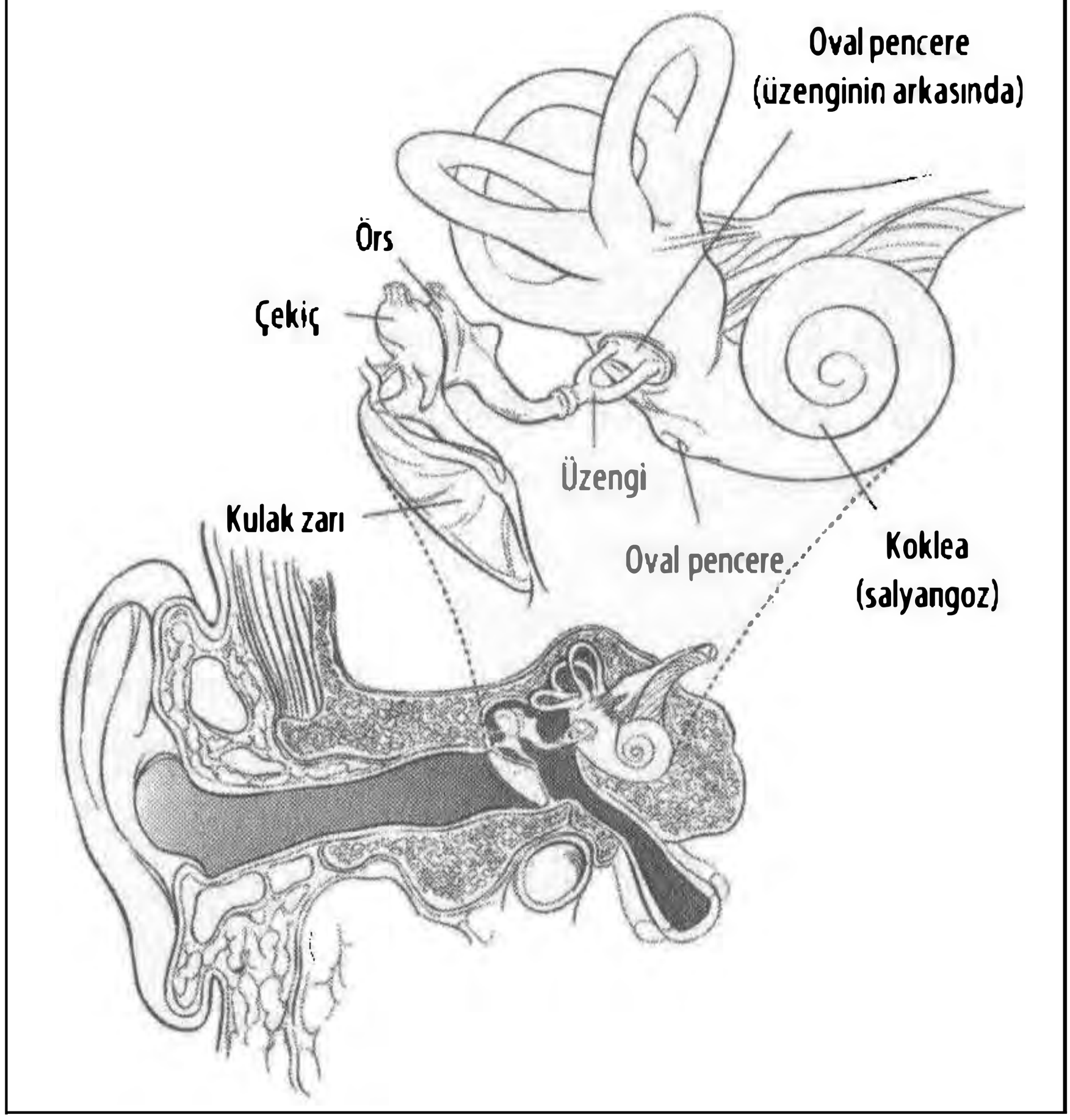


Şekil 5.1 Ses, bir ortamda yayılan basınçlı (yoğun) ve onları izleyen düşük basınçlı (az yoğun) molekül örüntülerinden oluşur. Seslerin dalga boyları veya frekansları ve genlikleri vardır ama ses kaynağının fiziksel konumu ses dalgasından oluşmaz.

Duymanın bazı yönleri doğrudan bu mekanik özelliklerle ilintilidir. Davula vurduğunuzda, davulun yüzeyi hızlı biçimde bir aşağı bir yukarı hareket eder ve bu hareket sırasında hava moleküllerinin yerlerinin değişmesine neden olur. Bu titreşim sırasında hava molekülleri ne kadar yoğun biçimde sıkışırsa, ses o kadar güçlü çıkar. Hava moleküllerinin hareketlerinin hızı ne kadar yüksekse, ses dalgasının frekansı ve algıladığımız ses perdesi de o kadar yüksek olur. Bir soprano şarkı söylerken hava molekülleri, bir tenorun şarkı söylediği zamankinden daha hızlı titreşir. Ses yüksekliği ve perdesine yönelik algımız, hava moleküllerinin hareket örüntülerinin farklı fiziksel niteliklerinden kaynaklanır.

Ses dalgaları kulağa ulaştığında, kulak zarının hava hareketleriyle uyum içinde titreşmesine neden olur. Düşük hava basıncı segmanları kulak zarını dışarı doğru çekerken, yüksek hava basıncı segmanları kulak zarını tekrar içeri doğru iter. Vücudun sese verdiği ilk biyolojik tepkidir bu ama henüz nöral bir tepki değildir. Kulak zarı deriye benzeyen bir zardır ve hiç nöronu yoktur.

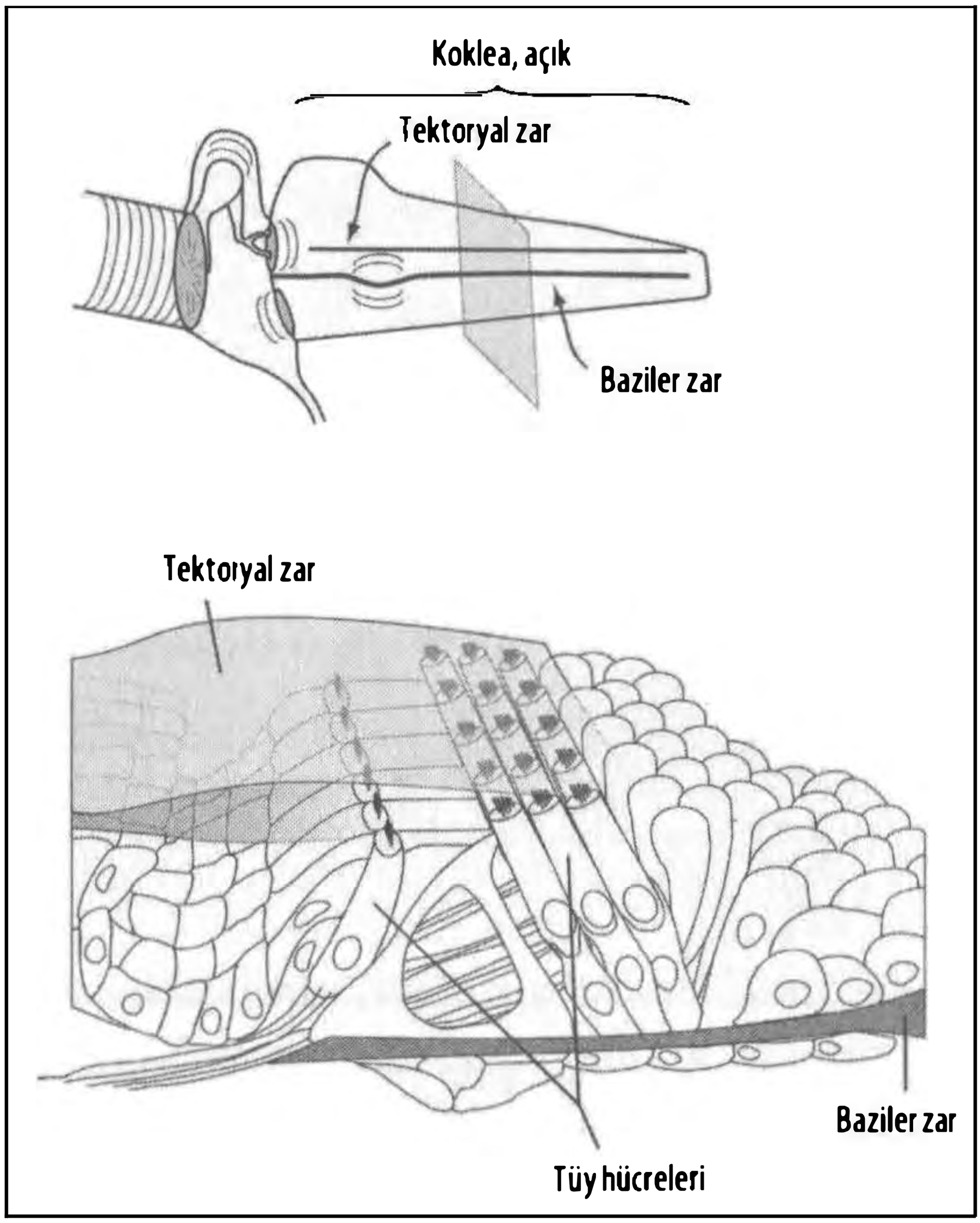
Kulak zarının titreşimleri önce küçük kemikçikler aracılığıyla kulağın derinliğinde bulunan *koklea* (kulak salyangozu) adlı spiral şekilli bir yapıya ulaşır (Şekil 5.2). Orada ses titreşimleri *baziler zar*



Şekil 5.2 Ses dalgaları kulak kanalına girer ve kulak zarının titreşmesine neden olur. Bu titreşimler bir dizi küçük kemik (çekiç, örs, üzengi) aracılığıyla kokleaya iletilir. Bu kemikçikler titreşimlerin kuvvetini kokleanın bir parçasını oluşturan küçük bir zar olan oval pencere üzerine yoğunlaştırarak onun kulak zarıyla eşzamanlı biçimde titreşmesine neden olur. Bu kemikçikler sesin enerjisini daha küçük bir yüzey alanı üzerine yoğunlaştırarak içi sıvı dolu kokleanın durgunluğunu giderir. (Bu şekildeki bazı yapılar vücudun dengesinde de rol oynar; bu konuyu 8. Bölüm'de ele alacağız.)

(kokleanın tabanında olduğu için bu adı almıştır) adındaki başka bir zarın hareketine neden olur (Şekil 5.3). Baziler zarın diğer ucu, sıvının içindeki bir kuşak gibi serbestçe yüzer. Titreşimler kokleaya ulaştığında, baziler zar zaman içinde kıvrılıp bükülmeye başlar.

Baziler zarın tepesinde tüy hücreleri adı verilen uzmanlaşmış nöronlar bulunur. (Bunlar aslında tüy değildir, tüye benzerler sadece.) Bu nöronların üzerinde *tektoryal zar* adı verilen daha katı bir örtü yer alır. Baziler zar ile tüy hücreleri dalga gibi bir aşağı bir yukarı titreşmeye başladığında bu tüyler çatıya sürtünmeye başlar, tıpkı kanocuların başlarının deniz mağarasının tavanına çarptığı gibi ama daha yararlı sonuçlar elde etmek için. Hücre zarındaki gözenekler

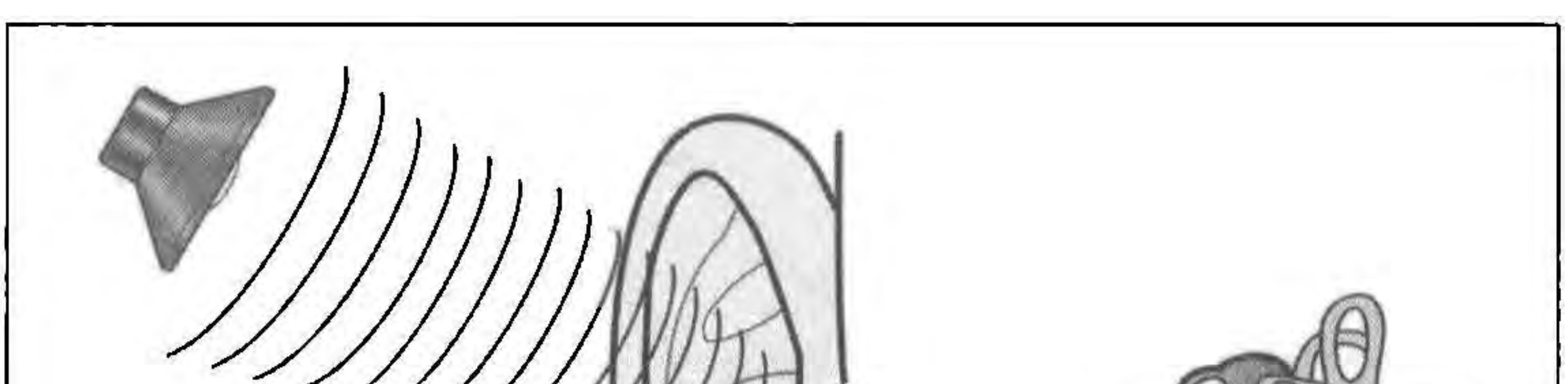


Şekil 5.3 Koklea içinde, baziler zar ses dalgalarıyla birlikte dalgalanır ama tektoryal zar adıyla bilinen sert örtü dalgalanmaz. Baziler zar üzerindeki tüy hücreleri bu dalgalarla birlikte dalgalanır ve bu sırada tüyleri tepedeki tektoryal zara sürtünür.

(iyon kanalları) ileri geri sürtünmenin yarattığı gerilimin sonucunda sırayla açılır veya açılmaya zorlanır. Tüy hücrelerini saran sıvı denizinde elektrik yüklü iyonlar bulunur. Tüyler bir yöne eğildiğinde bu iyonlar zar gözeneklerinden içeri girer, tüyler aksi yöne eğildiğinde ise gözenekler kapanır ve iyonlar hareketsizleşir, böylece sesi izleyen elektrik sinyalleri oluşur. Hava moleküllerinin hareketleri nöronlarda bu şekilde elektrik sinyallerine dönüşmüş olur! Daha sonra tüy hücreleri elektrik sinyallerini, kulaktan beyne bilgi ileten işitme sinirini oluşturan nöronlara aktarır.

SESİN FİZİKSEL DOĞASI, ses kaynağının yerinin tespit edilmesini zorlaştırır. 2. Bölüm'de gözbebeği ile merceğin, ışığın dünyadaki belli bir yönden retinanın yalnızca belli bir noktasına ulaşmasını sağladığını belirtmiştik. Ama bu tür bir imge oluşumu duymada gerçekleşemez çünkü ses dalgaları çok fazla *bükülgendir*. Ses düz hatlar halinde yol alabiliyor ve alıyor olsa da, aynı zamanda yolu üzerindeki nesnelerin ve engellerin çevresinden de dolanır. Bu sese özel bir durum değildir. Bir dalganın bükülerek bir nesnenin etrafından nasıl dolandığı, nesnenin büyüklüğüne ve dalga boyuna bağlıdır. Işığın dalga boyu gördüğümüz nesnelerden çok daha kısadır (milimetrenin 1/1000'inden daha kısa). Ses olarak duyduğumuz hava basıncı dalgaları 20 Hz ile 20.000 Hz arasında bir frekansa sahiptir, ki bu da on beş milimetre ile on beş metre arasında bir dalga boyuna karşılık gelir (ikincisi çok daha büyük, dolayısıyla çok daha bükülgendir).

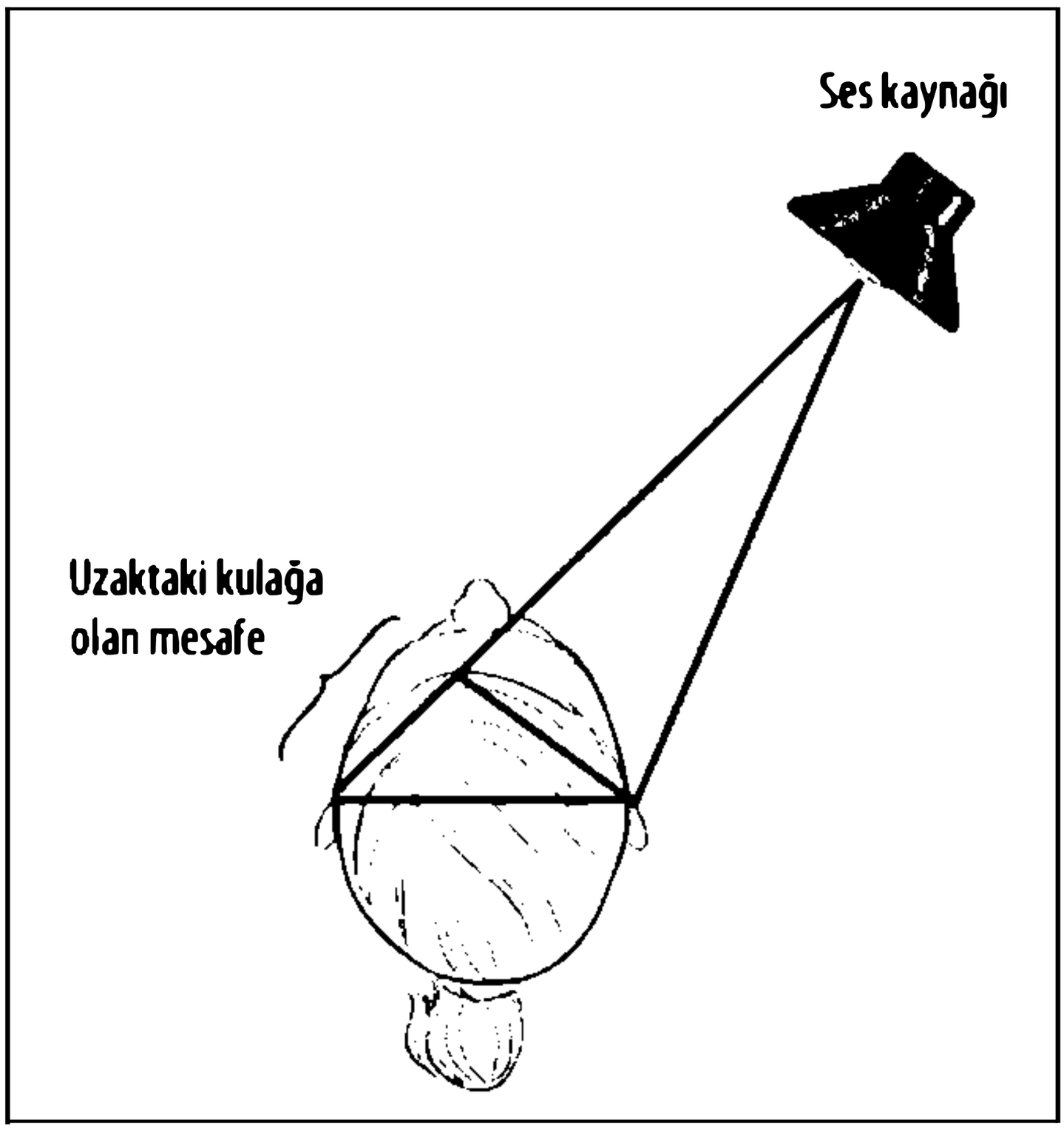
Ses dalgaları kulak kanalından kulak zarına ilerlerken, dalgaların bütün kaynak noktaları bir araya gelir (Şekil 5.4). Bu nedenle, koklea reseptörlerinin mekânsal düzeni seslerin mekânsal düzenini



Şekil 5.4 Kulak, göz gibi sesin geldiği yere dair bir imge oluşturamaz. Her yönden gelen ses dalgaları birlikte kulak kanalından aşağı ilerler, seslerin geldiği noktaların hepsi birbirine karışır.

sinyallerle iletebilecek durumda olmadığı için, sesin lokasyonuyla ilgili bilgi kaybolmuş gibidir. Ama beyin bu soruna bir yerine iki kulaktan yararlanmak gibi zekice bir çözüm geliştirmiştir. Kulaklarımızdan hiçbiri tek başına sesin nereden geldiğini anlayamasa da, birlikte bir sesin kaynak noktasını çıkarsamak için gerekli ipuçlarını elde edebilir. Beyin her bir kulağın duyabildiği son derece incelikli farklardan, sesin geldiği yerden kaynaklanan farklılıklardan yararlanarak sesin yeriyle ilgili çıkarsamada bulunur.

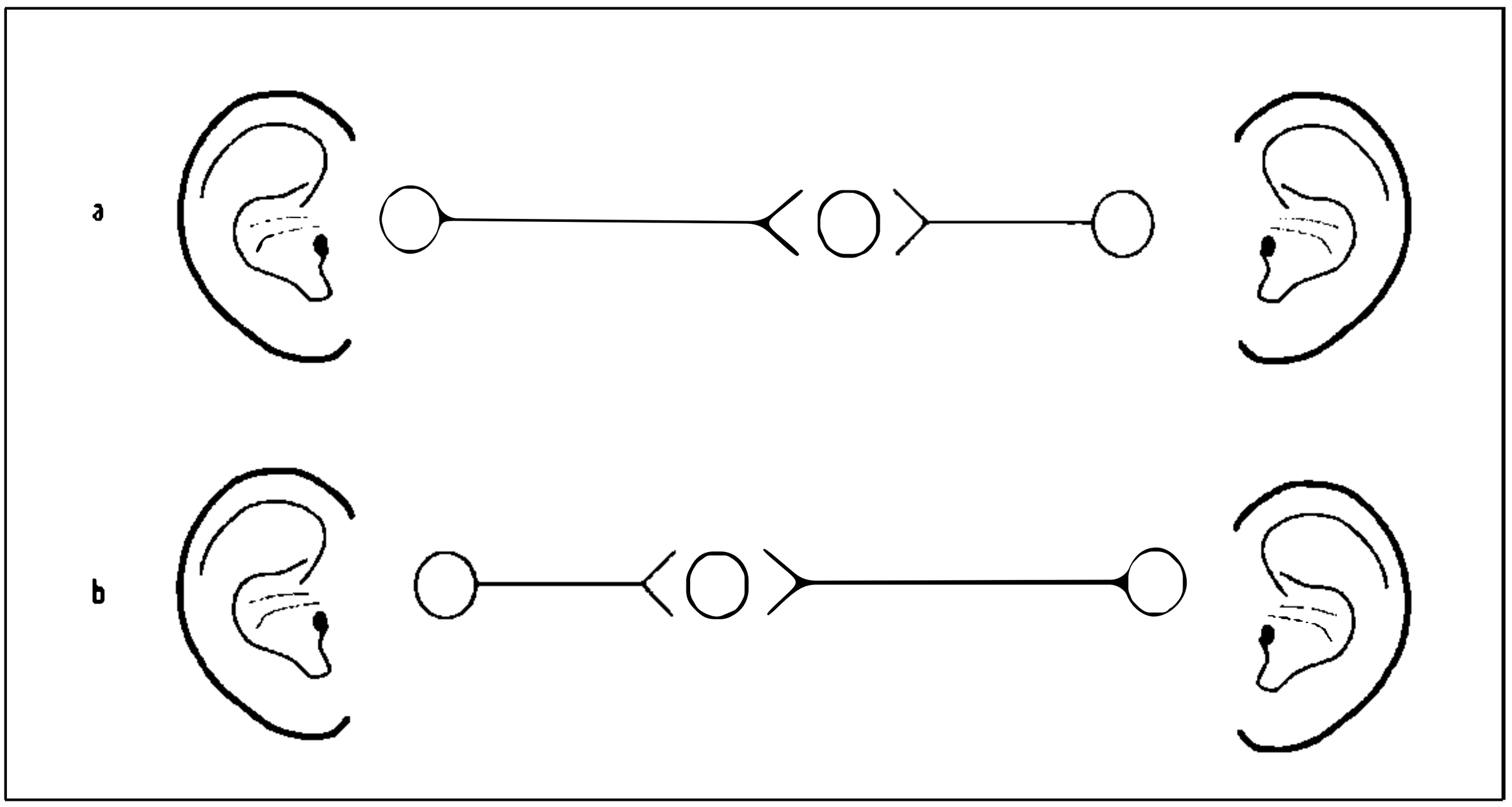
Bu incelikli ipuçlarından biri *zamandır.* Ses dalgaları saniyede yaklaşık 344 metre yol alır: hızlı ama bir yandan da yavaş, zira belli bir sesin her bir kulağa ulaşma zamanında küçük ama anlamlı bir fark söz konusudur (Şekil 5.5). Başınızın 0,175 metre genişliğinde olduğunu kabul edersek, tam sağ taraftan gelen bir sesin sol kulağınıza ulaşması sağ kulağınıza göre yaklaşık milisaniyenin yarısı kadar fazla zaman alacaktır.



Şekil 5.5 Sesin geldiği yer kısmen ses dalgalarının her bir kulağa ulaştığı süreden yola çıkılarak kestirilir. Ses saniyede yaklaşık 344 m yol alır. Sesin uzaktaki kulağa ulaşması için gereken ek süre, uzaktaki kulağın tepkisinde küçük bir gecikmeye neden olur. Bu gecikmenin büyüklüğü sesin hangi yönden geldiğine göre değişir: Ses dosdoğru karşıdan geldiğinde hiç gecikme yokken, tam yandan, yani yaklaşık iki kulağı birleştiren hayali hat üzerinden geldiğinde yarım milisaniyelik bir fark görülür.

Beyin bu zaman farklarını nasıl algılar? Bu sorun, görsel hareketi algılamada yaşanan soruna benzer: Beyin bir kulakta belli bir zamanda algılanan şey ile diğer kulakta *başka* bir zamanda algılanan şeyi kıyaslamak zorundadır. Bu çözümde görme sürecindekine benzer bir zihinsel zaman kaydırma işlemi de söz konusu olabilir.

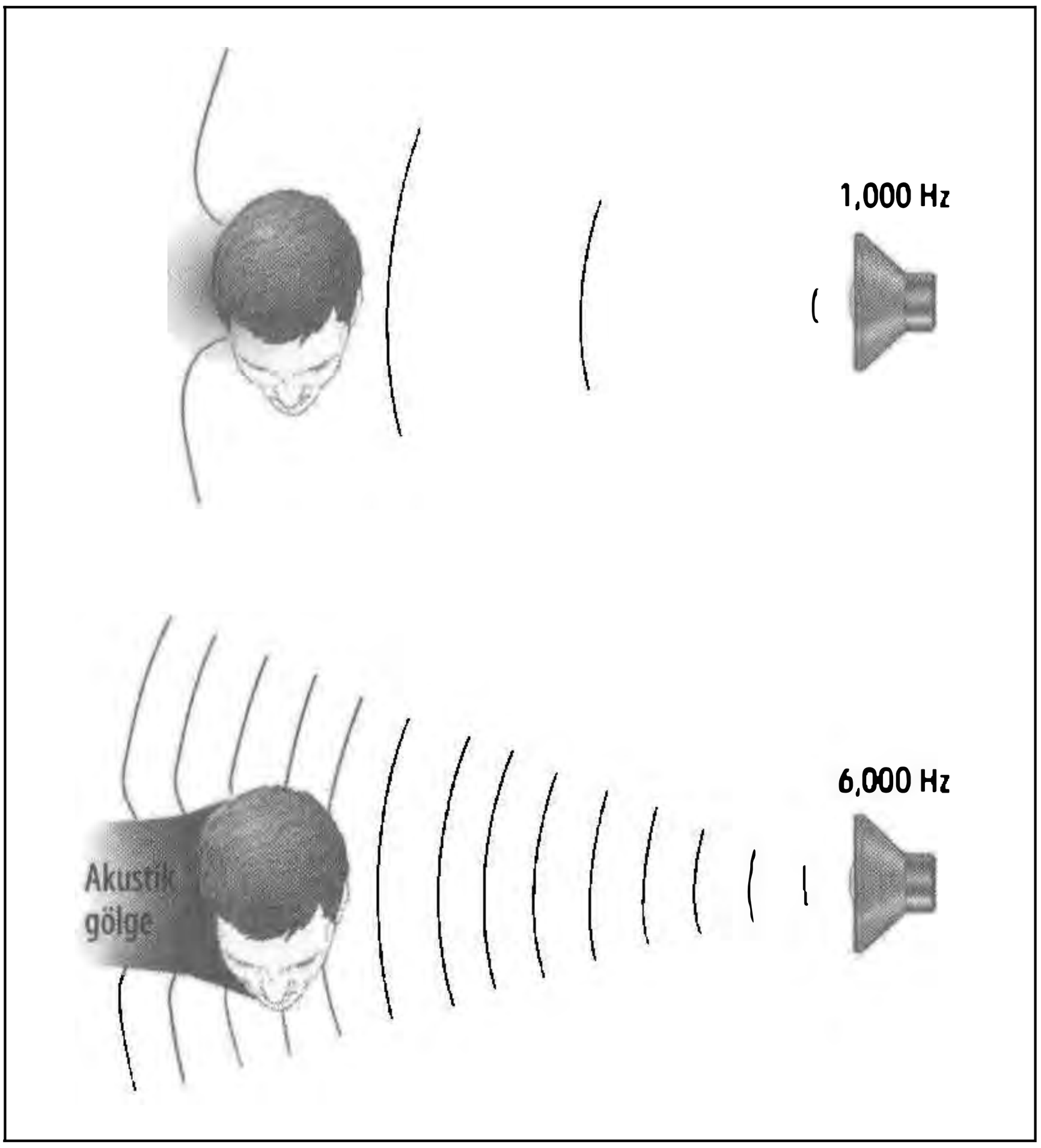
Beynin sesi algılamasının şu şekilde gerçekleştiği düşünülüyor: Her iki kulak sesin neden olduğu nöral sinyalleri o taraftaki işitme siniri aracılığıyla beyne gönderir. Beynin işitme yolundaki bazı nöronlar binöraldir, yani her iki kulaktan gelen sinyalleri alır (Şekil 5.6). Binöral nöronların iki kulağa ulaşan ses dalgalarının kulağa ulaşma sürelerine karşı hassas oldukları düşünülmektedir. Bazı nöronlar sesin ilk sol kulağa ulaşmasına karşı daha iyi tepki verirler, bazıları da ilk sağ kulağa ulaşmasına. Görsel hareket konusunda da gördüğümüz gibi, bu tür bir hassasiyet, her bir kulakta oluşan sinyaller farklı zaman alan yollardan ilerlediğinde oluşabilir. Bir kulağın ses önce ona ulaştığı için elde ettiği üstünlük uygun bir engelle



Şekil 5.6 İşitme yolundaki binöral nöronlar, sesin önce sol kulağa mı yoksa sağ kulağa mı geldiği konusunda hassastır. Bunda görsel hareket işleminde rol oynayana benzer bir mekanizmanın söz konusu olduğu düşünülüyor: Ses kaynağına yakın olan kulaktan gelen sinyal bir süre geciktirilir ki uzakta olan kulağa gelen sinyal onu yakalayabilsin. Sesin soldan gelmesi halinde *a*'daki nöron iki kulaktan çakışık girdiler alacaktır; *b*'deki nöron ise sağdan gelen seslere karşı daha hassas olacaktır.

ortadan kaldırılabilir, böylece sinyaller binöral nörona ulaştığında süreleri örtüşür. Bazı binöral nöronların soldan gelen girdileri elde ettiği kanallar daha uzundur, dolayısıyla soldan gelen seslere daha iyi tepki verirler (çünkü bu sayede sağ kulak aradaki farkı kapatmaya zaman bulur). Diğer binöral nöronlar da tam tersi özelliktedir ve sağdan gelen seslere yatkındır.

Beynimizin bunu yapabiliyor olması inanılmaz bir şeydir. Bu süreçte söz konusu olan zaman farkları son derece küçüktür, özellikle de sol veya sağdan değil, doğrudan gelen seslerde. Algılayabildiğimiz en küçük zaman farkı yaklaşık 10 ila 30 milisaniyedir (10 milisaniye, saniyenin 1/100.000'idir); ses bu zaman içinde 0,3 ila 0,9 cm yol alır. Bu da bir kişinin ses kaynaklarına 1,5 metre uzakta olması durumunda, ses kaynakları arasında yaklaşık 2,5 cm ile 7,5 cm ara-



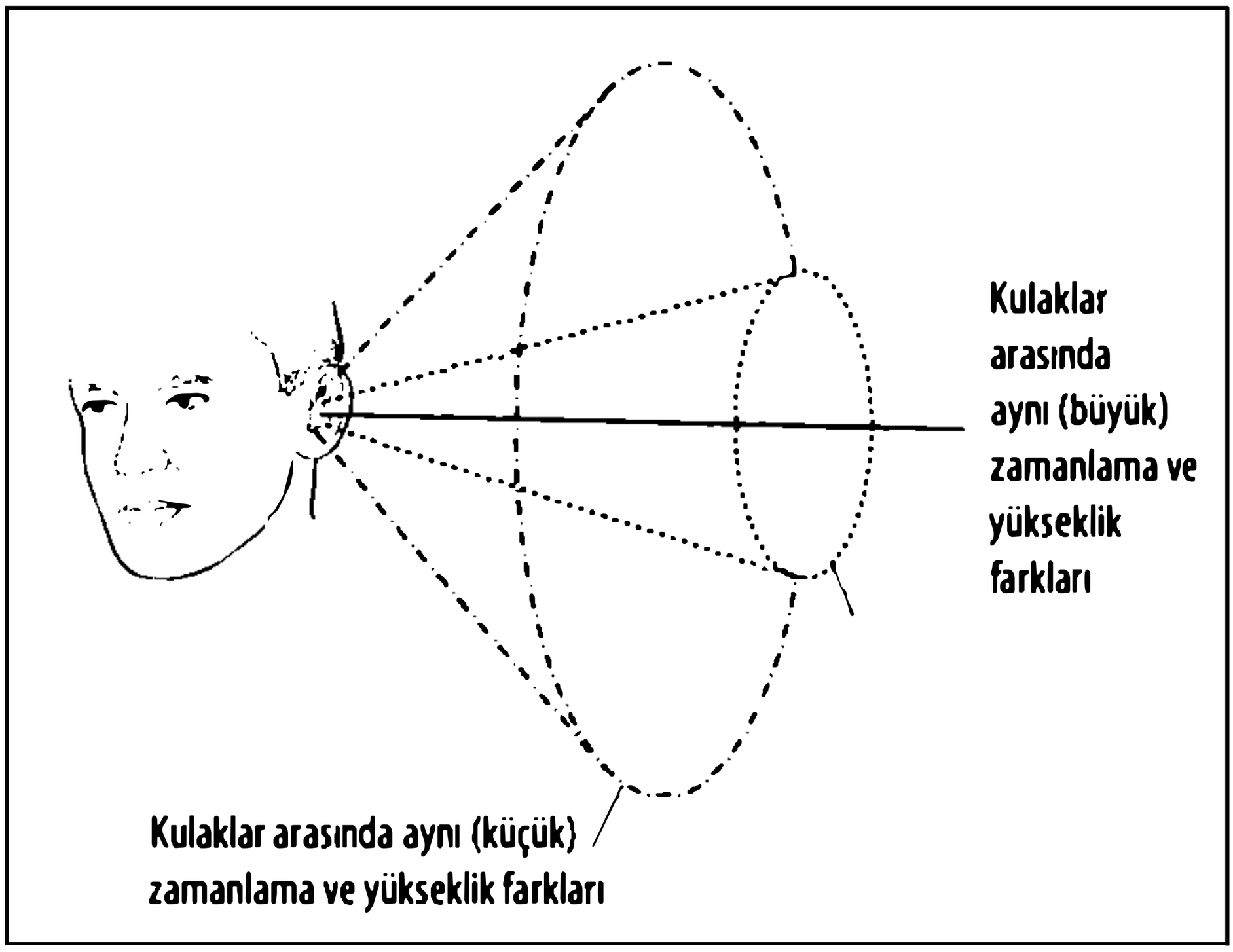
Şekil 5.7 Ses kaynağına yakın olan kulaktaki ses dalgaları daha yüksektir; sesin ne kadar yüksek olacağı sesin kesin yönüne olduğu kadar frekansına da bağlıdır. Yüksek frekanslı ses dalgaları, insan kafası büyüklüğündeki engellerle karşılaştığında daha az kıvrılır, böylece daha derin bir gölge oluşur; yani iki kulak arasında ses yüksekliği farkı daha fazla olur.

sında bir farka karşılık gelir. İşte bu nedenle, başka birininkinin hemen yanında olsa bile kendi cep telefonunuzun çaldığını anlayabilirsiniz.

İki kulağın *ses yüksekliğindeki* farklılıklar da sesin yerini belirlemede kullanılabilir (Şekil 5.7). Sese yakın olan kulak ses dalgasını engelsiz bir yoldan alır, ses daha yüksektir. Ses dalgasının başın diğer tarafına ulaşmak için bükülmesi veya kırılması gerekir, bu da sesin yumuşamasına neden olur. Bir kulağında işitme kaybı olan insanlar çoğunlukla, başlarının oluşturduğu engeli ortadan kaldırmak için daha iyi duyan kulaklarını sesin geldiği yöne çevirirler.

Başın oluşturduğu engel nedeniyle bir sesin yüksekliğinin ne kadar azaldığı, sesin nereden geldiğine bağlı olarak değişir. Ses tam ön taraftan geliyorsa iki kulakta sesin yüksekliğinde herhangi bir fark yoktur, ama sağdan gelen bir ses sağ kulakta sol kulağa göre on beş ila yirmi beş desibel daha yüksek olabilir. Ses yüksekliğinin derecesi sesin frekansına bağlıdır. Yüksek frekanslı seslerin dalga boyları daha kısadır ve engellerde daha az bükülme veya kırılma eğilimi gösterirler, dolayısıyla başın oluşturduğu engel daha etkilidir. Düşük frekanslı ve uzun dalga boylu sesler ise engellerin etrafından daha rahat geçer, dolayısıyla bu seslerin kulaklar arasındaki ses yüksekliği farkı daha azdır.

YİNE DE ORTADA hâlâ önemli bir sorun var. Bir sesin tam önümüzden, yukarıdan, aşağıdan veya arkamızdan gelip gelmediğini nasıl anlarız? Zamanlama ve ses yüksekliği farklılıkları, üç boyutlu dünyamız konusunda yalnızca tek boyutlu (iki kulağımızı birbirine bağlayan eksenden gelen) bir bilgi sunar bize. Dikey veya ön ve arka boyutlarla ilgili bilgi olmadan sesin lokasyonu belirsizdir. Belli bir zamanlama ve ses yüksekliği farkı, bir *karışıklık konisi* içindeki herhangi bir yerden gelen bir sese karşılık düşüyor olabilir (Şekil 5.8). Karışıklık konisi başın dışına doğru uzanır, merkezini kulakların arasındaki eksen oluşturur, yüzeyi ise kulaklar arası zamanlama veya ses yüksekliği uyuşmazlığına *neden olabilen* muhtemel bütün lokasyonları içerir. Karışıklık konisi bir çizgi (iki kulağı birleştiren hat) kadar küçük olabildiği gibi, başı ikiye bölen bir düzlem kadar büyük olabilir.

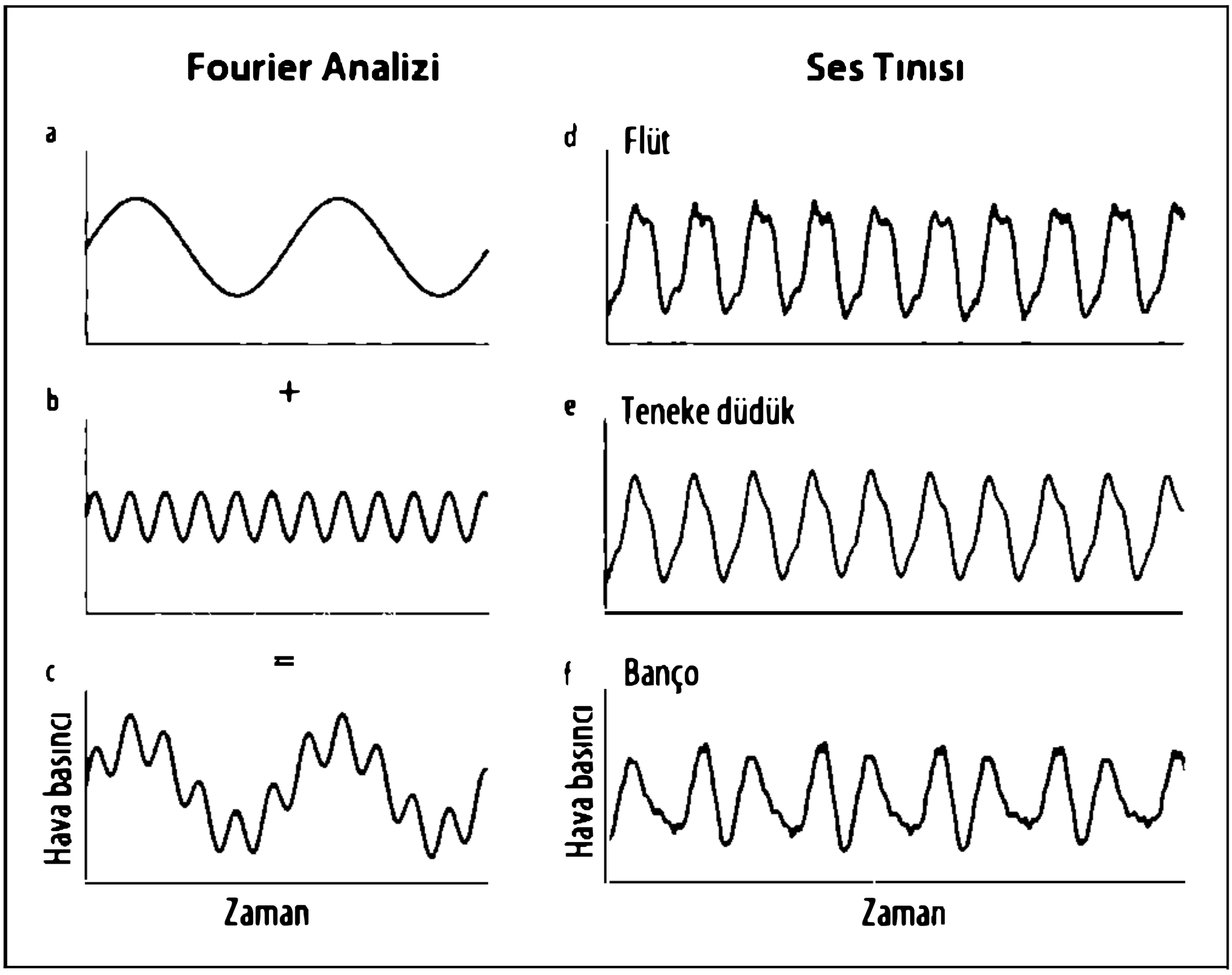


Şekil 5.8 Sesin kulaklara ulaşma süresindeki veya ses yüksekliğindeki farklılıklar belirsizdir. Şekilde tasvir edildiği gibi, belli bir koni üzerindeki her lokasyon zaman ve ses yüksekliği konusunda aynı farkları üretir. Buna *karışıklık konisi* adı verilir.

Neyse ki dış kulağınızdaki kıvrımlar bu sorunun çözülmesine yardımcı olur. Kulak kepçenizdeki tepeler ve vadiler sesi "yakalar" ve kulak kanalınıza yönlendirir. Bu kıvrımların şekil ve konumları sesle etkileşime girer veya sesin frekansına ve geldiği yere bağlı olarak sesi filtreler. Bunun nasıl çalıştığını anlamak için frekansın ne anlama geldiğini biraz daha ayrıntılı ele almamız gerekiyor.

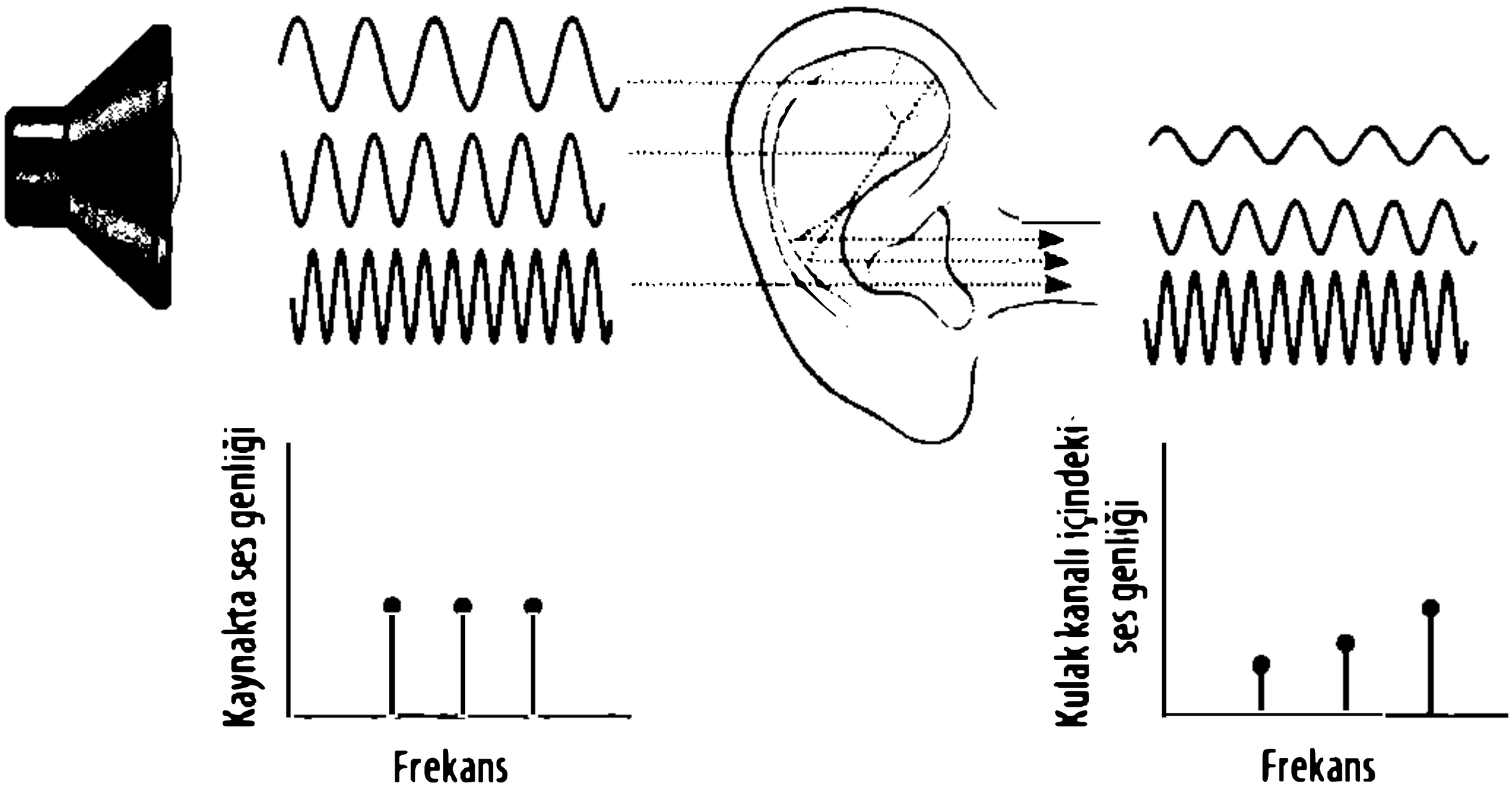
Duyduğumuz seslerin çoğunun birden fazla frekansı olduğu söylenebilir. Örneğin Şekil 5.9c'de tasvir edilen ses dalgası, eşzamanlı olarak iki farklı ölçekte salınır: daha küçük ve hızlı salınımlar halinde (Şekil 5.9b) ve daha büyük ve yavaş salınımlar halinde (Şekil 5.9a). Bu tür dalgaların, tekil ve sade frekanslardan oluşan daha basit dalgaların bir toplamı olduğu belirtilir; on dokuzuncu yüzyılda yaşamış Fransız matematikçi Joseph Fourier bunu güneş radyasyonunun ısı ve dalga sorunları üzerinde çalışırken keşfetmiştir.

Geniş bir frekans aralığında başlayan bir sesin içinde barındırdığı frekanslardan bazıları dış kulak tarafından zayıflatılır veya yumuşatılır (Şekil 5.10 ve 5.11). Hangi frekansların ne kadar kırılacağı



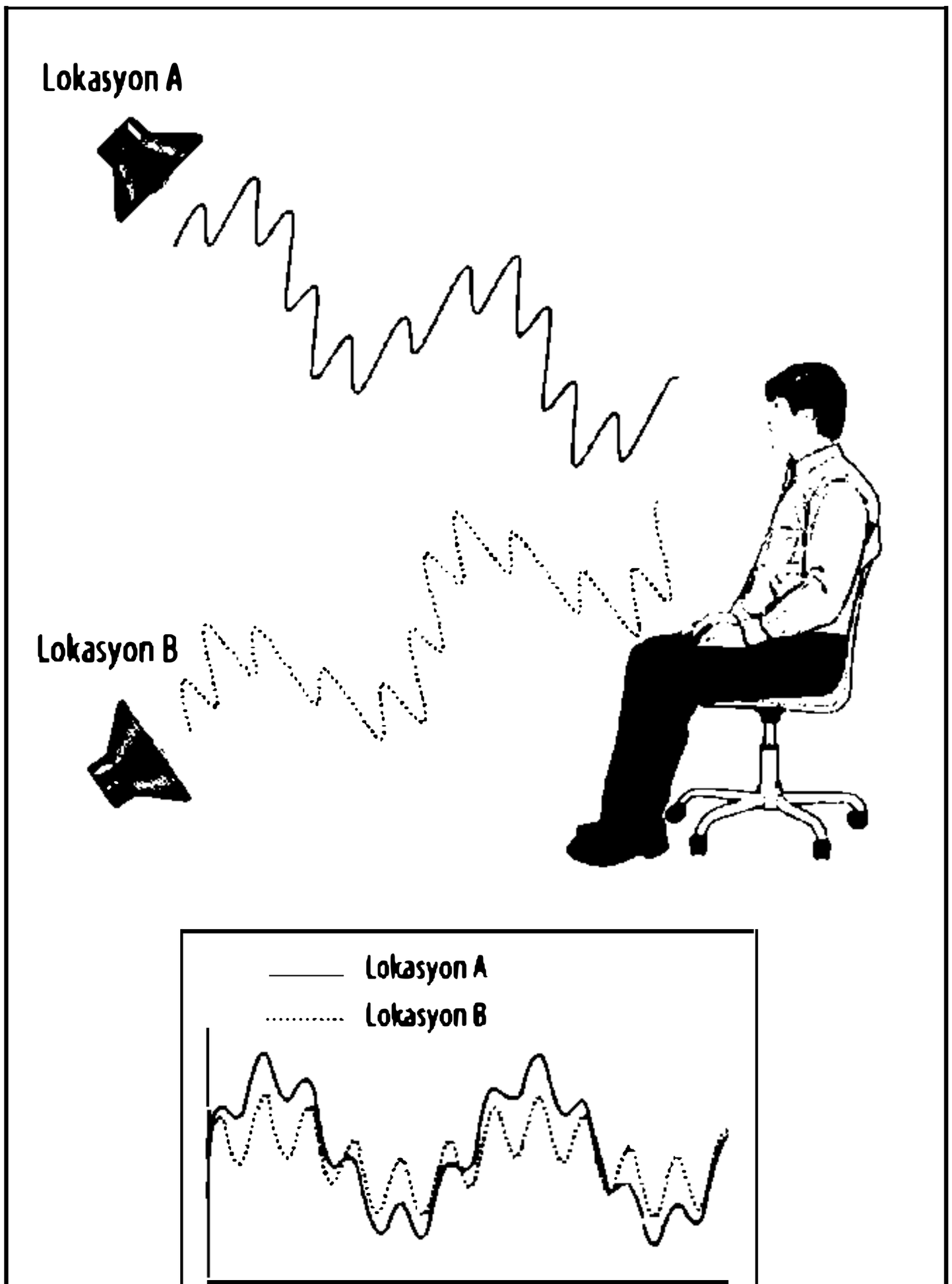
Şekil 5.9 Çoğu seslerin aynı anda birden fazla frekansa sahip olduğu düşünülebilir. Örneğin *c* panelindeki karmaşık dalga biçimi, büyük ve yavaş salınım ile küçük ve hızlı salınımdan oluşur. Bu dalga biçimi *a* ve *b*'de görülen saf tekil frekanslardan elde edilebilir. Bütün karmaşık dalgaların daha basit dalgaların toplamına benzetilebileceği genel ilkesi, on dokuzuncu yüzyılda matematikçi Joseph Fourier tarafından keşfedilmiştir. Bir müzik aleti tarafından çalınan bir nota gibi tek bir perde olarak duyduğumuz sesler bile aslında farklı birçok titreşim frekansından meydana gelir. Sağda (*d-f*) aynı notayı çalan çeşitli müzik aletlerinden örnekler yer alıyor. Her bir sesteki frekans farklılıkları sesin *tını* olarak adlandırılan algısal niteliğini oluşturur.

sesin nereden geldiğine bağlıdır, çünkü sesin geldiği yer, ses dalgalarının kulağın kıvrımlarından ve çukurlarından yansıma biçimini etkiler. Bazı frekanslar ile ses lokasyonlarında ses dalgaları birbirine karışır ve kulak kanalına girerken güç kaybeder. Bazılarında ise ses dalgaları birbirlerini güçlendirir; kulak kanalına girdikleri sırada daha da güçlüdürler. Kulak kıvrımları bir stereo sistemindeki ekolayzır gibi çalışır, sesin geldiği yere bağlı olarak bası veya tizi artırır. Sesin frekans ve lokasyon kombinasyonu temelinde gerçekleşen farklılaştırma filtrelemesi *spektral ipuçları* adıyla bilinir ve bu ipuçları sesin önden mi, arkadan mı, yukarıdan veya aşağıdan mı geldiğini anlamamıza yardımcı olur.



Şekil 5.10

Frekansı ve yönü farklı olan sesler kulakta farklı filtreleme işlemlerinden geçirilir. Filtreleme işlemi, sesin kulakların kıvrımlarında sekme ve yansıma örüntülerine göre gerçekleştirilir.



Şekil 5.11

Dış kulakta filtrelendikten sonra aynı ses dalgası, geldiği yere bağlı olarak, farklı frekansların göreli miktarları açısından küçük farklılıklar gösterir. Bu farklılıklara *spektral ipuçları* adı verilir.

Bu bilgiyi kullanabilmemiz için öncelikle bunun nasıl yapıldığını öğrenmemiz gerekir. Herkesin kulakları farklıdır ve kulağın sesi filtreleme biçimi farklılıklar gösterir. Sizinle yan yana oturup aynı konseri dinlesek de tam olarak aynı şeyleri duymayız. Kulak zarına ulaşan ses dalgasının özelliği, hem sesin kaynağına hem de kişinin kulak kepçesinin biçimine bağlıdır. Kulak kanalına küçük bir mikrofon yerleştirip mekân içinde farklı konumlarda sesin spektrumunu kaydederek bunu ölçmek mümkündür. Bu şekilde kaydedilmiş bir ses size kulaklıkla, yani dış kulağınız devre dışı bırakılarak ve sesin iki kez filtrelenmesi önlenerek dinletildiğinde, o sesi mekân içindeki özgün lokasyonundan (kayıt yapıldığı sırada sesin geldiği yerden) geliyormuş gibi duyarsınız. Ama arkadaşınızın kulak kanalından kaydedilen bir sesi aynı şekilde dinlediğinizde, sesi büyük ihtimalle başka bir yerden geliyormuş gibi duyarsınız. Beynimiz ancak kulaklarımızın ses filtreleme özelliklerini yorumlamayı öğrendikten sonra spektral ipuçlarını kullanabilir ve kulaklar arası zamanlama ve ses yüksekliği farklılıklarının neden olduğu karışıklık konisini yok edebilir.

Spektral ipuçları olmayan sesler kafanızın içinden geliyormuş hissi verir. Müzik geleneksel şekilde, yani mikrofon birinin kulak kanalı yerine müzisyenlerin yakınına yerleştirilerek kaydedildiğinde, kulak kepçesinin filtrelemesi kayda girmez. Böyle kaydedilmiş bir ses kulaklıkla dinletildiğinde, onu dışarıda bir yerlerde çalınıyormuş gibi değil, kulaklarınızın arasında bir yerde çalıyormuş gibi duyarsınız. Sesin başınızın *neresinden* (sola mı yoksa sağa mı yakın bir yerden) geldiği, stereo kayıtta mikrofonlar arası zamanlama ve ses yüksekliği farklılıklarının olup olmamasına bağlıdır.

Sadece bir kulağınızla işitiyorsanız bile, spektral ipuçları sesin geldiği yerle ilgili size kabaca bir fikir verecektir. Bir kulağı sağır olan veya çok az duyan (bu rahatsızlığı gerek sürekli gerekse tıkanma veya kulak enfeksiyonu nedeniyle geçici yaşayan) insanlar, her zamanki kulaklar arası zamanlama ve ses yüksekliği farkı ipuçlarından mahrumdurlar. Bu spektral ipuçları tek başlarına, zamanlama ve ses yüksekliği ipuçlarıyla birlikte çalıştıklarındaki kadar etkili değildir ama yine de hiç yoktan iyidir.

Spektral ipuçlarının önemini kendi başınıza test edebilirsiniz. Örneğin, sadece spektral ipuçlarıyla sesin geldiği yeri ne kadar algıladığınızı anlamak için bir kulağınıza kulak tıkacı takın. Sonra gözlerinizi kapatın ve arkadaşınızdan parmağını şıklatmasını isteyin. Parmağınızla sesin geldiğini düşündüğünüz yeri gösterin, sesin yerini algılamada işitmeniz engellenmediği zamanki kadar başarılı olamadığınızı göreceksiniz. Bir kulağı tıkamak sesin seviye farklarını ve spektral ipuçlarını tahrif eder, ama beyin zamanlama farklarını algılayabilir (tıkalı kulağınızla hâlâ bir şeylerduyabiliyorsanız eğer).

Kulak kepçesini bir şekilde değiştirerek spektral ipuçlarının değişmesine neden olmak da sesin geldiği yeri tespit etme yeteneğinizi etkiler. Kulak kepçesini büyütmek için elinize bir tabak alın ve bir kulağınızın arkasına tutun. Bu büyük, düz yüzey daha fazla sesi "yakalayacak" ve tek başına kulağınızın oluşturacağından biraz farklı bir filtreleme örüntüsü yaratacaktır. Kulak kepçenizin kıvrımlarını, onları kil hamuruyla kaplayarak yok edebilirsiniz (kil hamurunun kulak kanalına kaçmaması için dikkatli olun). Kulak kepçenizin büyüklüğünü veya yapısını bu şekilde değiştirmek, ses lokasyonu algısını, özellikle de dikey veya önden ve arkadan gelen seslere dair lokasyon algısını değiştirecektir. Zamanlama ve ses yüksekliği ipuçları ise yatay boyuttaki seslerle ilgili doğru bilgi iletmeyi büyük ihtimalle sürdürecektir.

Zamanlama, ses seviyesi ve spektral ipuçları seslerin yerlerini, amaçlarımıza uygun biçimde belirlememizi sağlar. Bazı yırtıcı hayvanlar (baykuş gibi) ise evrimleşmeleri sırasında, gece avlanırken onlara yardımcı olan daha sofistike ses lokalizasyon sistemleri geliştirmiştir. Bir baykuş, havada ve kapkara, uçsuz bucaksız (hem yatay hem dikey) bir alanda, yere bağlı yaşayan insanın karşılaşmayacağı zorluklarla karşılaşır. İnsanlar çoğunlukla önemli seslerin kendi yükseklik seviyelerinde veya yerden birkaç metre yüksekliktеki alan dahilinde olduğunu varsayar. Biri ikinci katın penceresinden size seslendiğinde, yukarı bakmanız biraz zaman alır. Uçmakta olan bir baykuş ise, yalnızca solunu ve sağını değil, aynı zamanda önüyle arkasını ve yukarısıyla aşağısını hızlı ve doğru bir biçimde değerlendirmeden geçirmek durumundadır. Bir baykuşun karışıklık konisi, lezzetli bir akşam yemeğinin önündeki engeldir.

Bu engelin üstesinden nasıl geldikleri peçeli baykuşlar üzerinde yoğun biçimde araştırılmıştır (s. 109, Resim 7). Peçeli baykuşlar, hem yatay hem dikey boyutlardan gelen seslerin yerini belirleme becerilerini artıran ve daha önce sözü geçen karışıklık konisini en aza indiren uzmanlaşmış özelliklere sahiptir. Peçeli baykuşların suratlarında bir eğri büğrülük vardır, kulakları farklı yönlere çevrilidir. Kulaklarından biri biraz yukarı, diğeri biraz aşağı bakar. Bu onlara, dikey gelen seslerde ses seviyesi farklılığıyla ilgili ipucu sağlar. Peçeli baykuşlar genel olarak hem yatay hem de dikey boyutlarda iki derecelik bir açıya kadar bütün seslerin yerini algılayabilirler (olağanüstü bir şeydir bu, özellikle de başlarının büyüklüğü nedeniyle zamanlama ve seviye farklılığı ipuçlarının insanlara göre çok daha az olduğu düşünülürse).

İNSANLAR bir peçeli baykuş gibi olmasa da, normalde tek başına sesten yola çıkarak bir arabanın hangi yönden geldiğini veya sınıftaki hangi öğrencinin soru sorduğunu kolayca anlayabilir. O halde, pili zayıflamış bir duman dedektörünün yerini bulmakta neden zorlanıyoruz? Yakın zamanlarda internetten işitme alanında çalışan sinirbilimcileri araştırdım ve epey bir fikir edindim.

Bazıları bu sorunun dikey boyuttan ve karışıklık konisinden kaynaklandığı görüşündeydi. Gelgelelim bu görüş yaşadığım şeyle örtüşmüyor, çünkü bir kere kafanı en çok karıştıran şey dikey boyut değil. Duman dedektörlerinin tavana monte edildiği bilgisi karışıklık konisi meselemi çözüyor.

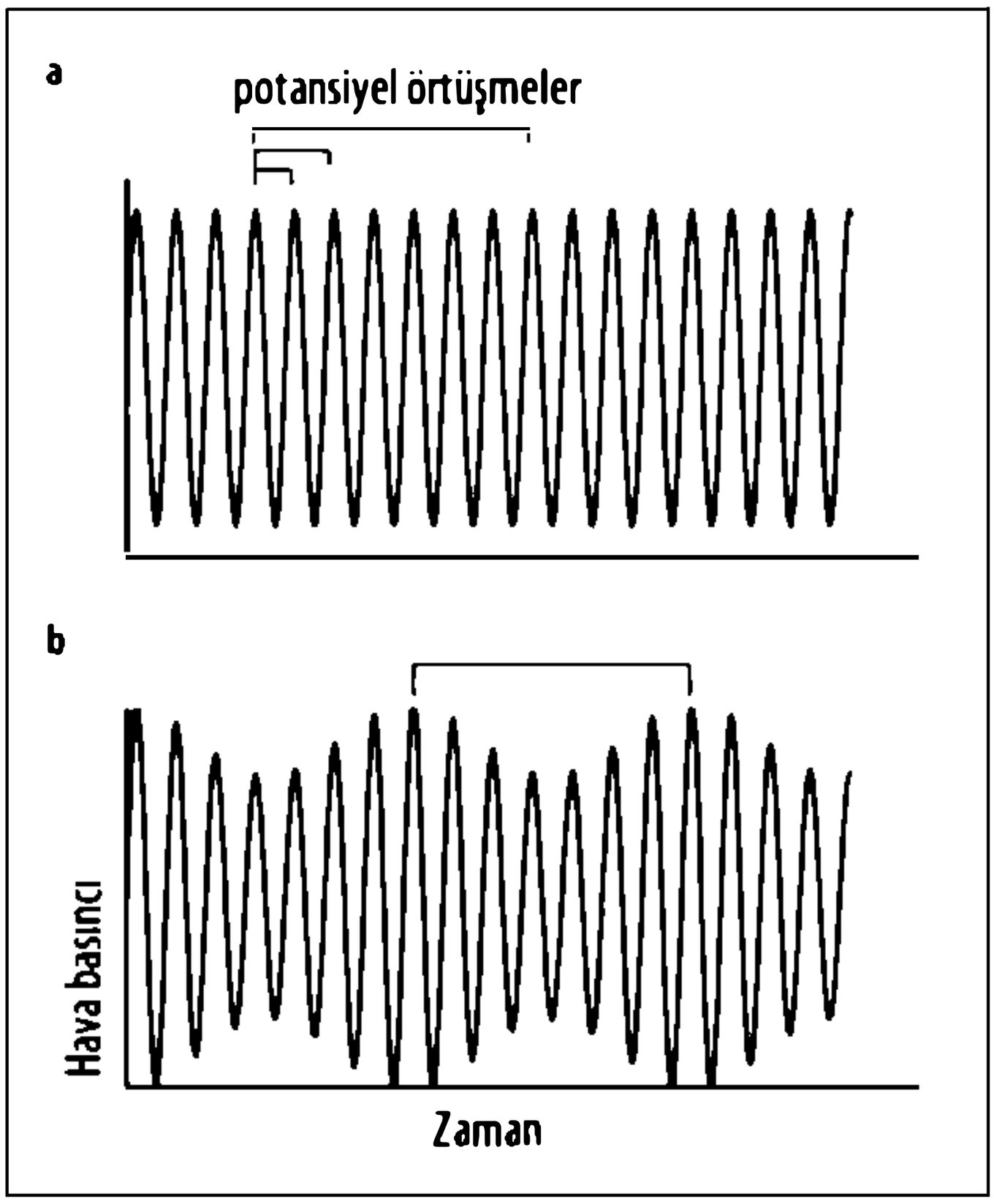
Bazıları sorunu *örtüşme* diye tabir edilen bir meseleye atfetmekteydi. Belli tür seslerde, iki kulakta duyulan sesler zamanda yan yana "sıralandığında" nereden geldiklerini belirlemek zordur. Yaklaşık 2000 Hz'lik (müzikte, orta do'nun yaklaşık dört oktav üzeri) tek frekanslı bir sesi ele alalım. Sesin dalga boyu yaklaşık 17 santimdir, yani yaklaşık yetişkin bir insanın kafatasının çapında. Ses soldan geliyorsa, önce sol kulağınıza ulaşır, sağ kulağınıza ise aşağı yukarı yarım milisaniye sonra ulaşır. Ama ses devam ederse, göreli zaman farkı belirsizleşir. Ses dalgasının art arda gelen birçok tepe ve alt noktaları iki kulağa ulaşır. Sesin dalga boyu kafatasının çapı büyüklüğünde olursa, sol kulağınıza ses dalgasının tepesi ulaştığı sırada

sağ kulağınıza da önceki dalganın ona eş tepesi ulaşır. İki tepe de özdeş olduğu ve aynı anda duyulduğu için, beyniniz (mantıklı olarak ama hatalı biçimde) sesin önden geldiği sonucuna varabilir. Ses dalgalarının böyle birçok yolla örtüşmesinin mümkün oluşu, sesin özgün lokasyonuyla ilgili belirsizliğe neden olur.

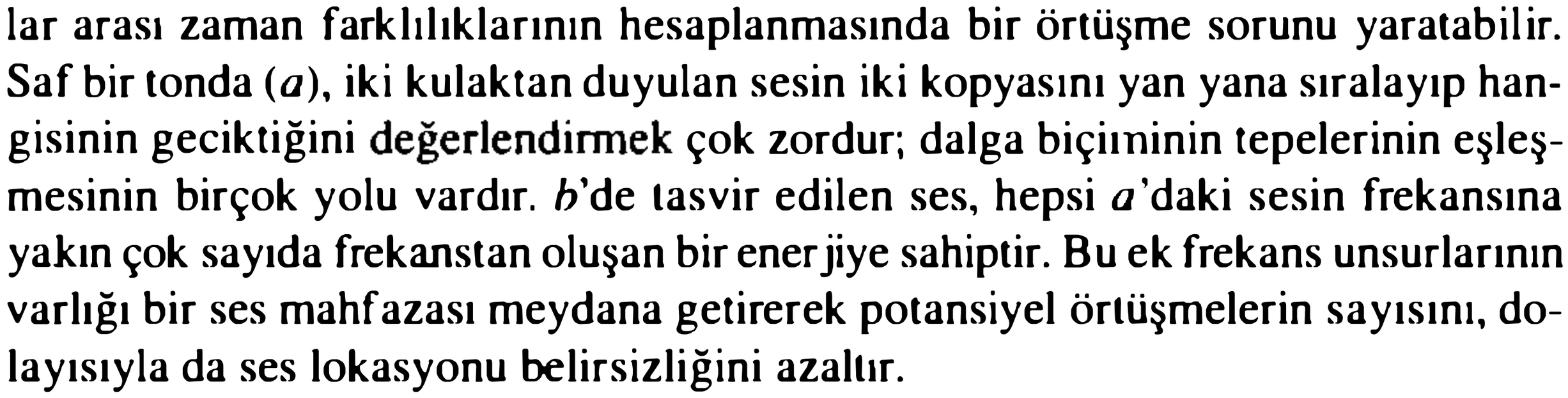
Frekansı 2000 Hz'den düşük olan seslerde bu sorun oluşmaz. Bir sesin dalga boyu kafatasının çapından büyükse, dalga biçiminin eş bölümleri arasındaki göreli zamansal gecikmenin yalnızca tek bir yorumu mümkündür. Frekansı 500 Hz olan, yani kafatasının dört katı büyüklüğünde dalga boyuna sahip bir sesi ele alalım. Ses soldan geliyorsa, ses dalgasının tepesi önce sol kulağa ulaşır; sağ kulağa ulaştığında, sol kulak dalga döngüsünün ancak dörtte birlik bölümünü tamamlamıştır. Bir sonraki tepe sol kulağa ulaştığı sırada, sağ kulaktaki tepe çoktan gitmiştir. Bu tür düşük frekanslı seslerde, doğru dalga biçimi uyuşmasının dışındaki uyuşmalar kafamızın olduğundan çok daha büyük olmasını gerektirir. Daha yüksek frekanslı seslerde bile, birden fazla frekans olması durumunda dalga biçimi genelde tek bir çözüme imkân verecek derecede karmaşıklaşır (bkz. Şekil 5.12) – tabii ek frekansların harmonik olmaması veya en düşük frekansın tamsayı katları büyüklüğünde olmaması koşuluyla (bu ikinci durumda periyodu en düşük frekans belirler).

Peki bu örtüşme sorunu duman dedektörleri meselesine uyuyor mu? Bu sorunun cevabı bence hayır. Örtüşme, dedektör ortamda duman olduğu için alarm verdiğinde geçerli olabilir, pilin zayıfladığını haber vermek için kısa kısa öttüğünde değil. Geçenlerde evde pili zayıflamış bir duman dedektörünün sesini kaydettim ve 3100 Hz dolayında *temel* veya ana frekansa sahip olduğunu, içinde bu frekansın yüksek katları büyüklüğünde çeşitli harmonikler barındırdığını keşfettim (Şekil 5.13). Örtüşme yaratacak kadar yüksek bir değerdir bu – ama sadece sesin başını kaçırdığınızda. Pili zayıflamış duman dedektörlerindeki gibi, seslerin net bir başlama ve bitiş noktaları varsa, bu "kenarlar" sesin ortasında oluşabilecek olan örtüşme sorununu ortadan kaldırır. Gerçek bir alarmın sabit sesindeyse durum farklıdır.

İki güçlü ihtimal var. Biri sesin spektral içeriğine yönelik çıkarımlarda bulunma biçimimizle ilgili. Spektral ipuçlarını yorumlamak, *kıyaslama* için bir temel gerektirir. İlkesel olarak bu kıyaslama



Şekil 5.12 Seslerde çoğunlukla tekrar eden bir dalga biçimi bulunur, bu da kulaklar arası zaman farklılıklarının hesaplanmasında bir örtüşme sorunu yaratabilir. Saf bir tonda (*a*), iki kulaktan duyulan sesin iki kopyasını yan yana sıralayıp hangisinin geciktiğini değerlendirmek çok zordur; dalga biçiminin tepelerinin eşleşmesinin birçok yolu vardır. *b*'de tasvir edilen ses, hepsi *a*'daki sesin frekansına yakın çok sayıda frekanstan oluşan bir enerjiye sahiptir. Bu ek frekans unsurlarının varlığı bir ses mahfazası meydana getirerek potansiyel örtüşmelerin sayısını, dolayısıyla da ses lokasyonu belirsizliğini azaltır.



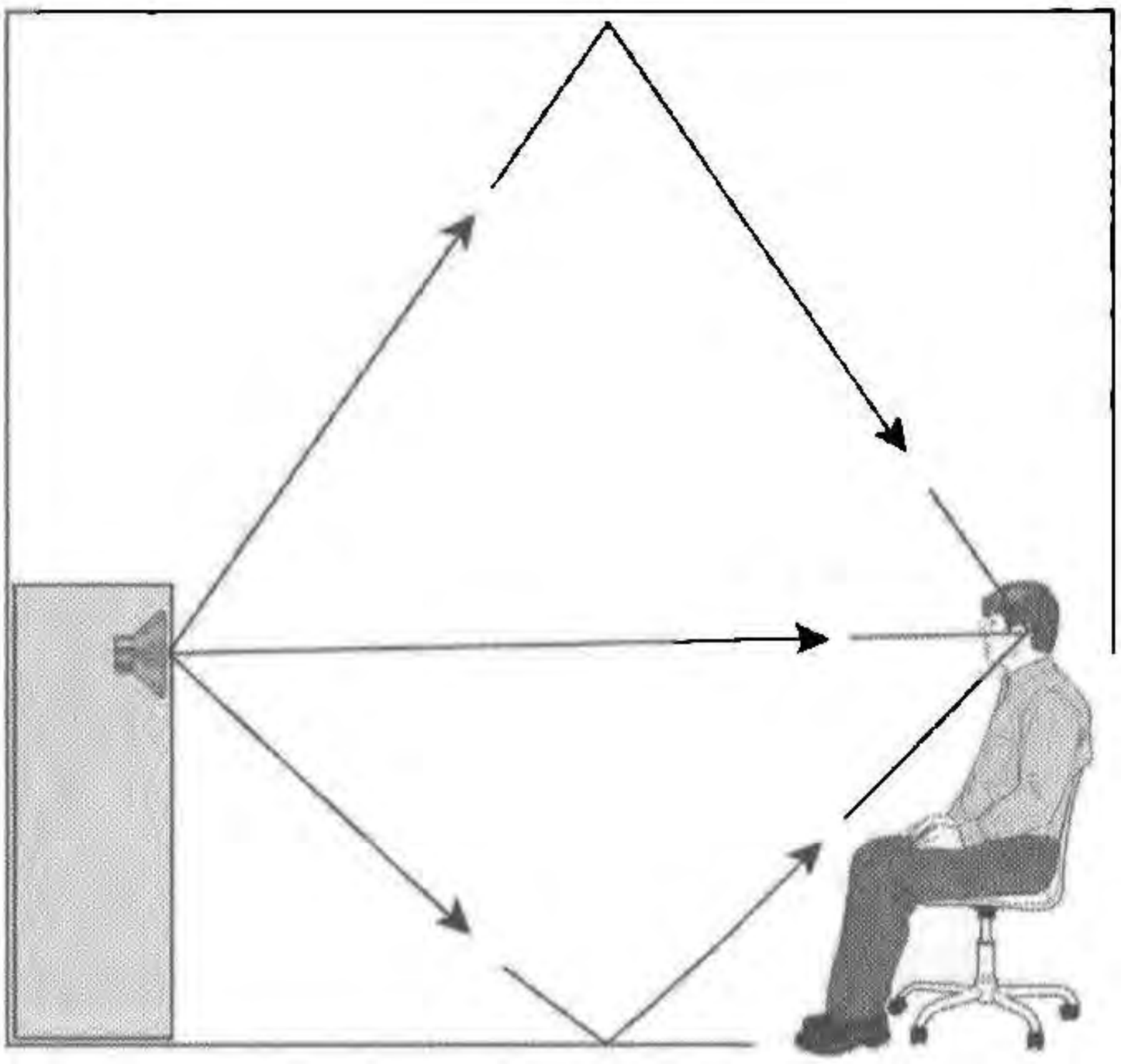
Şekil 5.13 Pili zayıflamış bir duman dedektörünün sinyalinin ses dalgası (*a*) ve frekans aralığı (*b*). Frekans aralığı grafiğinde de görüldüğü gibi, ses frekansı 3000 Hz'nin üstündedir. (Bu grafikler, stereo ekolayzırının göstergesi gibi, her frekansın enerjisinin ne kadarının sesi oluşturduğunu gösterir.) Bu durum sesi örtüşme tehlikesi bölgesine sokar. Ama sesin ani sıçramaları da vardır ve bu sıçramalar zamanlama temelinde sesin yerinin tespitini mümkün kılar. Burada görülen çoklu frekanslar (ses aralığı grafiğindeki çoklu pikler) harmoniktir, dolayısıyla örtüşme sorunlarının çözümünde pek işe yaramazlar.

birkaç şekilde yapılabilir. Sol ve sağ kulakların ses örneklerinin frekans içeriklerini karşılaştırabiliriz veya bir kulaktaki sönüm örüntüsünü farklı frekanslar üzerinden inceleyebiliriz: hangi frekanslar sessiz, hangileri yüksek? Veya duymakta olduğumuz sesi, daha önce duyduğumuz sesle (hafızamızdan) karşılaştırabiliriz.

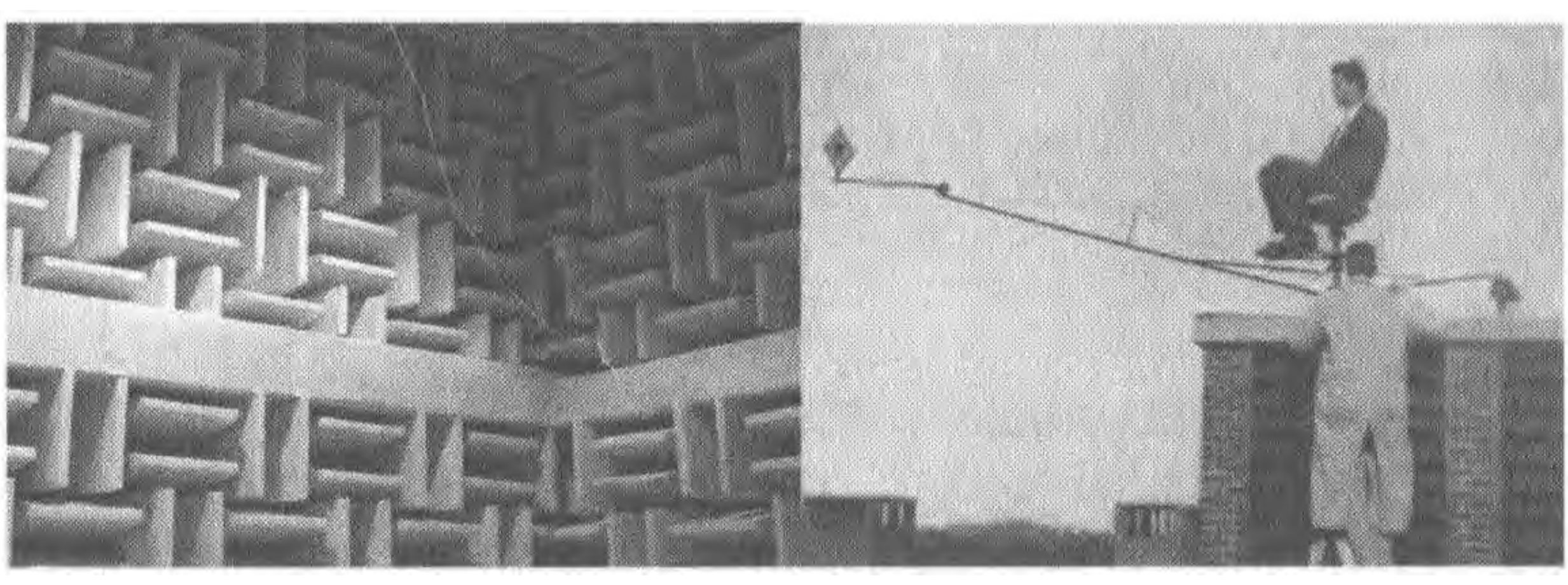
Bütün bu kıyaslama yöntemleri birçok sıradan sese ve iki kulakla gerçekleştirilen normal işitmeye uygulanabilir. Bir ses tanıdıksa, farklı birçok frekans barındırıyorsa ve iki kulakla da işitiliyorsa, beyin çeşitli kıyaslama yöntemleri kullanabilir. Sevdiklerinizin sesi, çok iyi tanıdığınız, spektral açıdan zengin bir ses en ideal uyaran olacaktır. Peki ya yılda bir veya iki kez pili zayıflayan bir aletin sesi? O kadar tanıdık olmayan, çok farklı frekansları bulunmayan, dolayısıyla da kaynağı kolayca anlaşılamayan bir sestir bu.

Diğer ihtimallerde ise yankı rol oynar. Bilinçli olarak farkında olmasak da, sesler duvarlara, yere, tavana, masaya, hatta omuzlarımıza çarpıp seker (Şekil 5.14). Dolayısıyla, tek bir ses kaynağının varlığında bile, kulaklarımıza ulaşan ses dalgaları çeşitli yollardan geçer. Bu olay işitsel bir aynalı oda etkisi yaratır: Her nesne birçok kez duyulur ve ses kopyalarının büyük bir bölümü, ses kaynağının gerçek lokasyonuyla ilgisi olmayan yerlerden geliyor gibidir. Kulaklarımız bu kopyaların akınına uğrar – özellikle de, bir katedralin taş zemini ve duvarları veya bir banyonun fayanslı yüzeyleri gibi, içinde birçok katı yüzey barındıran mekânlarda. Bunlar gibi yankılı yerler, sesleri çok güçlü biçimde yansıtır. En az yankılı yerler genellikle dışarıdadır; duvarlardan, tavanlardan ve katı mobilyalardan uzak ortamlar veya özellikle yankıya karşı tasarlanmış laboratuvarlardır (Şekil 5.15). En az yankının olduğu yerlerden biri de, sesi yutan karlarla kaplı açık alanlardır muhtemelen. Başka yerlerde ise beyninizin en az birkaç yankıyla baş etmesi gerekecektir.

Yankılı yerlerde sesin gerçek lokasyonunu anlamak için beyniniz, bir sesin ilk ânını dinler ve sonradan gelen ses kopyalarını veya yankıları duymazdan gelir. Yüzeylerden seken yankılar, sesin "düz yol"u takip eden kopyasından biraz daha uzağa gider. Yansıma yüzeyleri birbirine yakınsa ve yankının yol aldığı fazladan mesafe kısaysa, bu yankılar özgün sesin hemen peşi sıra gider. Sesin süresi ile yankının süresi arasındaki gecikme çoğunlukla azdır, dolayısıyla



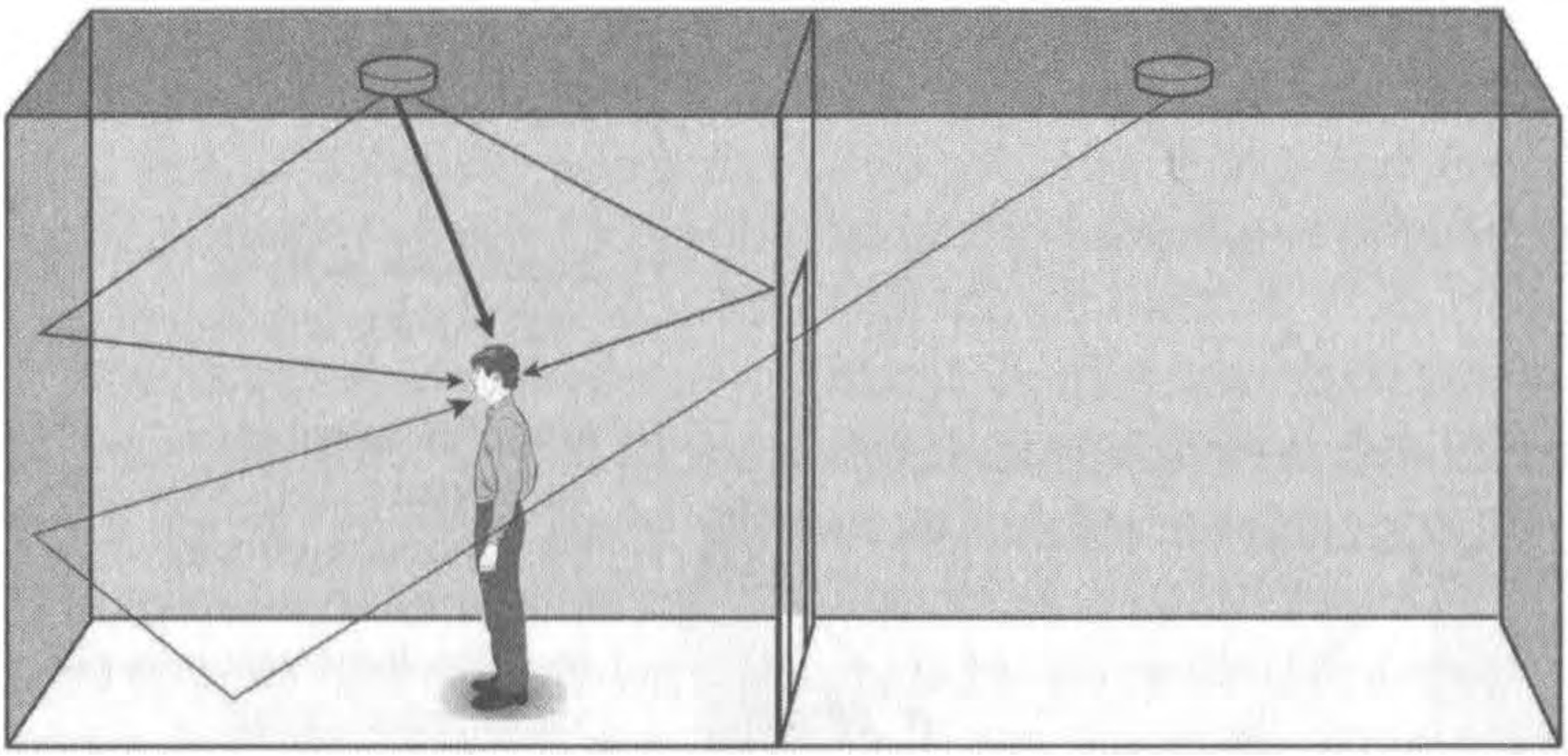
Şekil 5.14 Belli bir kaynaktan gelen ses, kulağa ulaşana kadar çeşitli yollar izler. Ses dalgaları kaynaktan kulağa doğrusal bir yol izledikleri gibi, kulağa zemin, tavan, duvar, mobilya, hatta omzunuz gibi yakınlardaki çeşitli yüzeylerden yansıyarak da ulaşır.



Şekil 5.15 Yankıları önlemek için yüzeyin sesleri yutan materyallerle kaplanması gerekir. Soldaki fotoğrafta, duvarları köpük takozlarla kaplı bir *yankısız oda* görülüyor. Bunun gibi bir odada sesler, sesin yansıyıp yankı oluşmasına neden olacak çok az yüzeyin bulunduğu yumuşak zeminli dış mekânlardaki seslere benzer. İşitme konusunda yankısız bir odada çalışma yapmak, sağdaki 1936 tarihli fotoğrafta görülen yöntemle çalışmaktan hem daha güvenlidir, hem daha rahattır.

özgün ses ile yankıların zamanı çakışır. Ama ses çok kısaysa, yankıyı bilinçli olarak fark etmeyiz. İlk sese yoğunlaşıp yankıları yok sayma eğilimimize *öncelik etkisi* adı verilir. Beynin bu yankıları ayrı sesler olarak işlemden geçirmesi ancak amfitiyatro, mağara veya büyük bir viyadüğün altı gibi, yankı gecikmelerinin uzun olduğu yerlerde gerçekleşir. Beynimizin bir sesin ilk kopyasına yoğunlaşması, aynalı oda sorununun giderilmesine yardımcı olur.

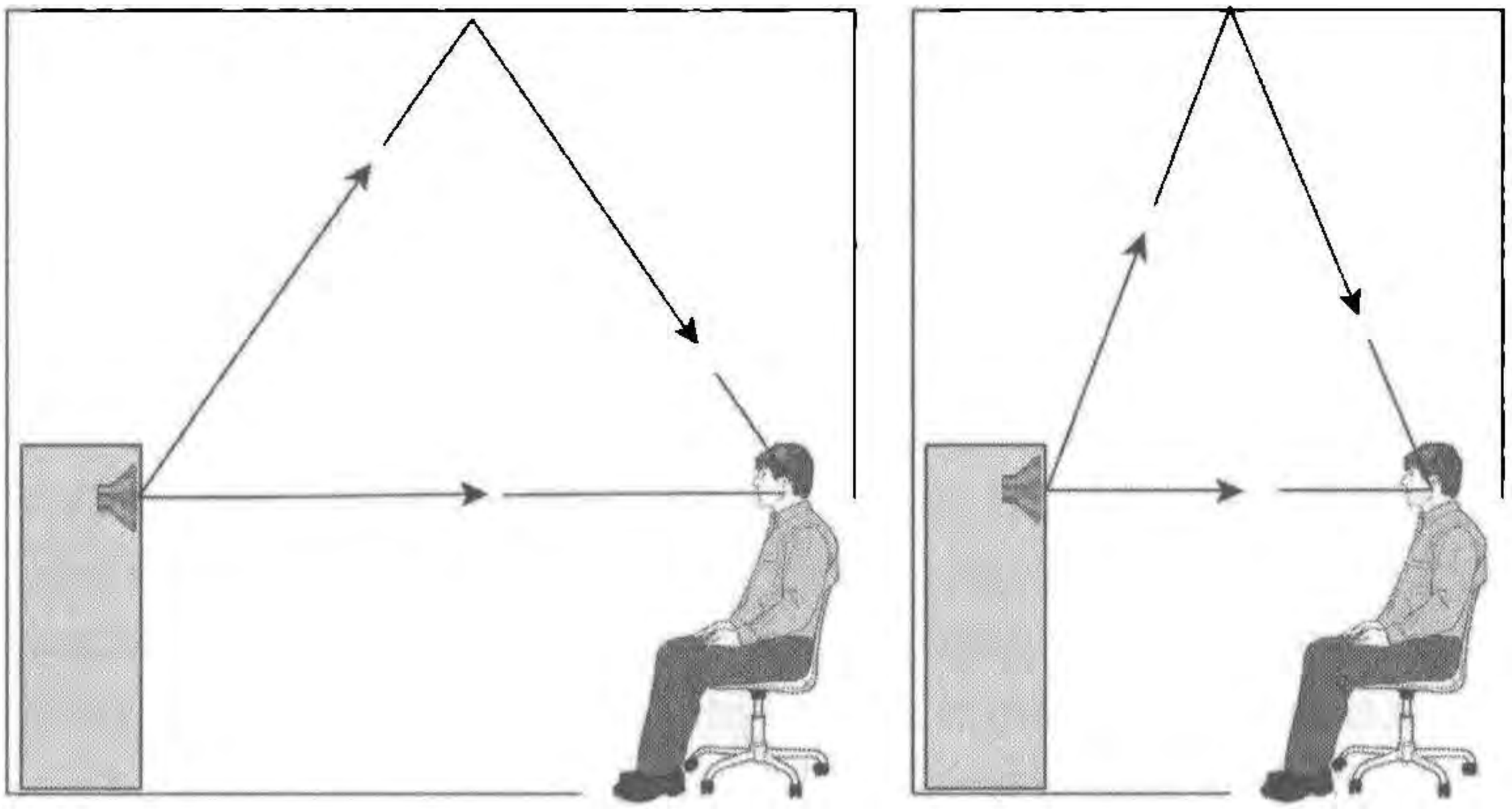
Öncelik etkisine göre, pili zayıflamış bir duman dedektörünün



Şekil 5.16 Ses farklı bir odadan geliyorsa, hangi duman dedektörünün sinyal verdiğini tespit etmek zordur. Eğer alarmı içinde bulunduğunuz odada ötüyorsa, öncelik etkisi yankıları yok eder. Zamanlama ve seviye farklılıkları, sesin düz yol kopyasının lokasyonunu doğrulayacaktır (*kalın çizgi*). Ama alarm başka bir odada ötüyorsa, ses kapı aralığından geçerek ve başka yüzeylerden yansıyarak, yani dolaylı yollardan kulağınıza ulaşacaktır. Sesin geldiği yönün sesin kaynağıyla pek ilişkisi olmayacaktır.

sinyali, yankıların varlığına rağmen hemen bulunabiliyor olmalıdır; ama doğru odada bulunmanız şartıyla! Dedektörün sinyali yandaki odadan geliyorsa, o zaman ses kapı aralığından kulağınıza gelmek durumundadır ve kulaklarınıza birçok yüzeyden yansıdıktan sonra ulaşır (Şekil 5.16). Böyle bir sesin hiç "düz yol"dan giden kopyası olmaz, birçok yönden gelen birçok yankısı olur. Bu durum belirsizlik ve tereddüt hissi yaratır. Bu nedenle en iyi strateji, oda oda dolaşıp dinlemek ve sesin bu odalardan birinin alarmından mı, antreden mi yoksa belirsiz bir yönden mi geldiğini araştırmaktır. Yakın zamanlarda bu stratejiyi kullanarak hedefime doğru ilerledim, pili zayıflamış dedektörü şıp diye buldum.

ÖTMEKTE OLAN duman dedektörünün ne kadar uzakta olduğunu onu dinleyerek anlamak neden kolay değildir? Bir kere, doğru odada olup olmadığımızı anlamamız için sesin yeterli uzaklıkta olması gerekir. Ama sesin uzaklığı, sesin boyutları içinde tespit edilmesi en zor olanıdır. Görsel sistemde uzaklık tespitinde kullanılan yöntemlerin çoğu işitmede işe yaramaz. Oklüzyon da işe yaramaz, çünkü



Şekil 5.17 Sesler kulaklarınıza yankıların izlediği yoldan daha kısa olan doğrusal bir yol izleyerek ulaşır. Doğrusal yol ile yankı yolları arasındaki fark, sesin yansıyan yüzeylere göre size ne kadar yakın olduğuna bağlı olarak değişiklik gösterir. Yakından gelen seslerde, düz bir hat izleyen sesin yankısıyla arasındaki yükseklik farkı, uzaktan gelen seslere kıyasla daha fazladır.

ses engellerin etrafından dolanabilir. Ayrıca stereovizyonun muadili de başka bir şey için kullanılır: İki kulak arasında yapılan kıyaslamalar bize yatay (baykuşlara ise dikey) boyut hakkında bilgi verir.

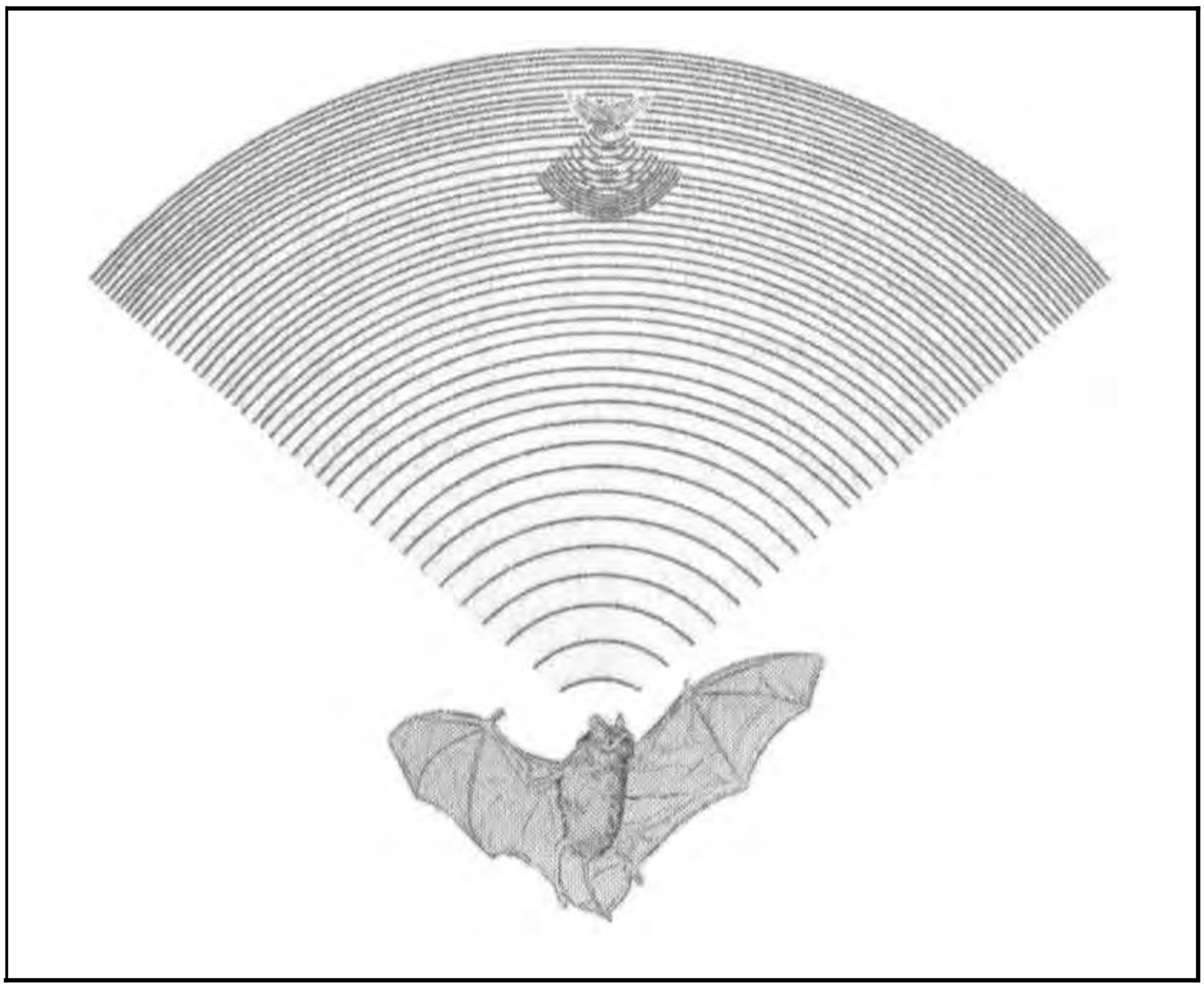
Uzaklıkla ilgili ana ipucumuz sesin yüksekliğidir. Otoyolun birkaç blok ötesinde trafik gürültüsü otoyolun dibinde bulunan, birkaç metre ötede arabaların cirit attığı bir yere göre daha azdır. Bunun nedeni ses dalgalarının genliklerinin uzağa gittikçe azalmasıdır. Bunun depolanmış izlenimlerin zihinsel kıyaslamalarını da içerdiğini unutmayın; bir arabanın çıkardığı sesi, arabaların farklı mesafelerde çıkardıkları seslere dair anılarınızla ilintili olarak değerlendirirsiniz. Tanınmayan seslerde ise böyle bir kıyaslama imkânsızdır, yakından gelen hafif bir sesi uzaktan gelen güçlü bir sesten ayırt etmek güç olabilir. Pili zayıflamış duman dedektörleri sinyallerinin ses yüksekliğine pek aşina olmamamız, sesin hangi odadan geldiğini anlamakta zorlanmamıza neden olur.

Yankılar, sesin geldiği uzaklıkla ilgili ipuçlarını ön bilgiye ihtiyaç duymadan verirler (Şekil 5.17). Bir sesin doğrudan kulaklara ulaşan kopyasından daha uzağa gidebildikleri için yankılar daha za-

yıftır ve kulaklara ulaşmaları daha uzun zaman alır. Ne kadar yol alacakları, ne kadar yavaş ve zayıf olduklarına bağlıdır. Sizi kuşatan sahneye göre yakınınızdan gelen bir seste, düz gelen ses, uzaktaki duvarlardan yansıyarak gelen yankılardan daha güçlüdür. Gelişteki gecikmeyle birlikte bu oran (ilk ses/yankının şiddeti) sesin ne kadar uzakta olduğunu anlamamıza yardımcı olur. Bu yöntem tek başına bir sesin *mutlak* mesafesiyle ilgili bilgi sunamaz: Beyniniz bunu metre hesabına çeviremez. Ama bir sesin çevrenize göre nispi uzaklığını bildirebilir – odanın ortaları veya uzaktaki duvarın civarı gibi. Doğrudan ses-yankı oranı, o duvarların göze dayalı uzaklık tahminiyle birleştiğinde, beyin sesin o ortam içindeki muhtemel uzaklığıyla ilgili bir fikir elde edebilir.

Yankılar duvarların, tavanların, hatta mobilyaların büyüklüğü, uzaklığı ve sertliğiyle ilgili ipuçları da sunabilir. Çoğu kişinin kulağı, akustik uzmanlarının canlı mekân olarak adlandırdığı yankı seviyesi yüksek mekânlar ile çok az yankı üreten ölü mekânlar arasındaki farkı anlayabilir. Gözleri gören insanlar bu ipuçlarını duyduklarının bilincinde olmayabilirler ama körler bu ipuçlarından çok fazla yararlanırlar. Hatta yankısını duymak için ses üretirler; buna *ekolokasyon* adı verilir. Bir değneği yere vurduğunuzda kısa ve sert bir ses çıkar; bitişik yüzeylerden yansıyarak gelen yankıları algılamak için ideal bir sestir bu. Gözleri gören insanlar da ekolokasyondan biraz yararlanırlar. Gece tuvalete kalktığınızda, eşiniz uyanmasın diye ışıkları açmadan banyoya doğru yürürken, adımlarınızın çıkardığı seslerin yankıları duvara toslamanızı önler.

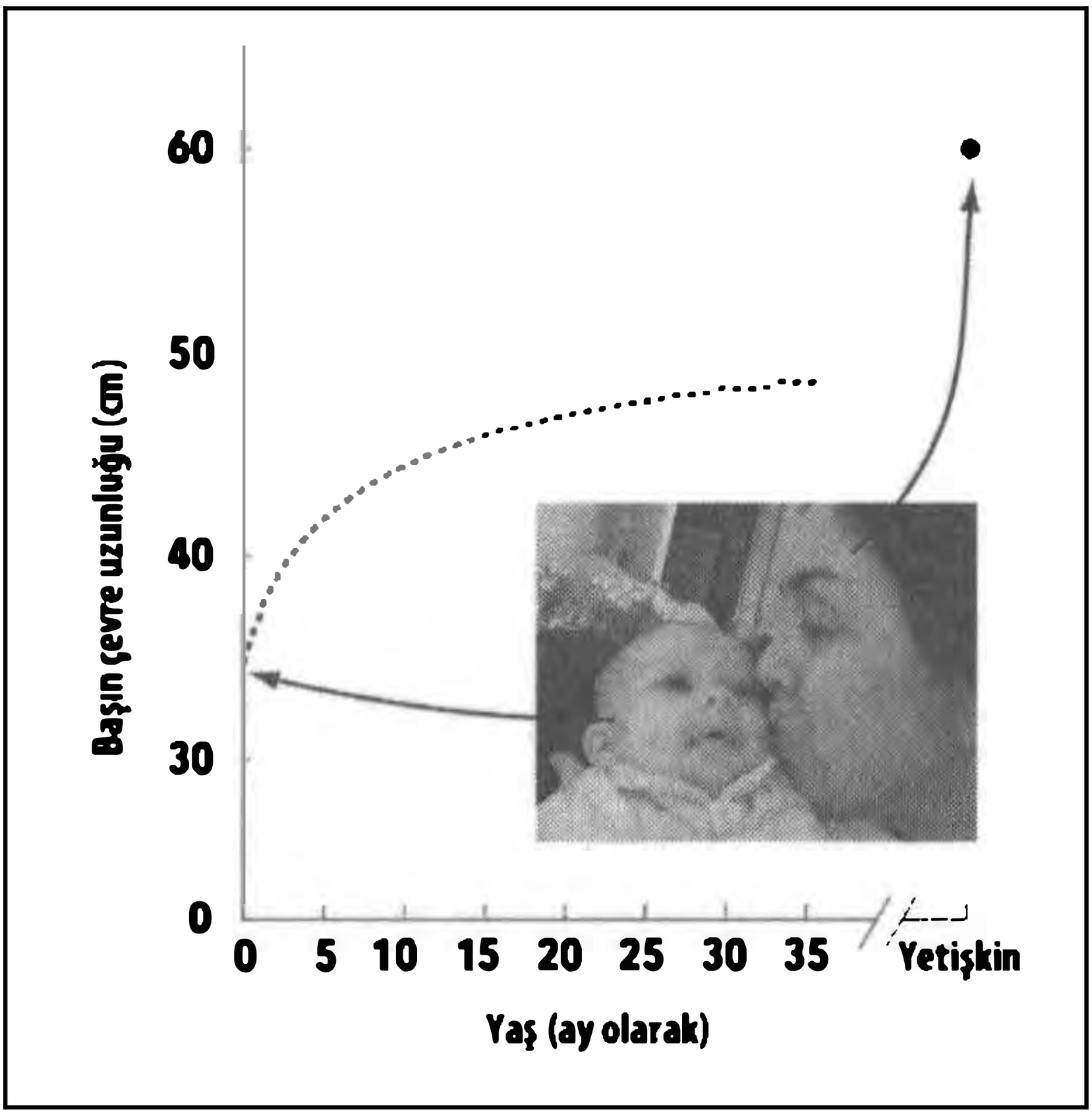
İnsanlar ekolokasyonu *becerebilirler*, yarasalar ise bu işin uzmanıdırlar. Bu uçan gece yırtıcıları da baykuşlar gibi yiyeceklerini bulmak için sese bağımlıdırlar, ama onlar kendi çıkardıkları seslerin yansımaları sayesinde *sessiz* nesneleri de bulabilirler. Yarasalar sık aralıklarla kısa ve tiz sesler çıkarırlar, bu seslerin engellere ve avlarının vücutlarına çarparak çıkardığı yankıları dinlerler (Şekil 5.18). (Bu seslerin frekansları insan kulağının duyamayacağı kadar yüksektir, yarasaların sıkça hedefinde olan güveler ise bu aralıktaki seslere karşı hassasiyet geliştirmişlerdir, bu sesi duyar duymaz o ortamdan kaçarlar.) Yarasalar bu sesi kendileri başlattıkları için sesin ne zaman başladığını bilirler, dolayısıyla yankının sesten sonra ku-



Şekil 5.18 Yarasalar avlarını bulmak için ekolokasyondan yani sonar yönteminden yararlanırlar. Kısa ve tiz sesler çıkardıktan sonra, bu seslerin yankılarından nesnenin yerini algılamakla kalmazlar, nesnenin ayrıntılarını ve şeklini de algılayabilirler. Yarasa uzmanı Donald Griffin'in çiziminin model alndığı bu çizimde, bir yarasa ile bir böceğin çıkardığı seslerin ve bu seslerin yarattığı yankıların büyüklüğü kıyaslanıyor.

laklarına gecikmeli olarak gelen sesi, onlara nesnenin *uzaklığı* hakkında bilgi verir. Yankıları algılamada o kadar hünerlidirler ki, piyano telleriyle örülü bir odada tellere hiç çarpmadan uçabilirler ve havaya fırlatılmış bir un kurdunu havada kapabilirler.[1]

SES ZAMANLAMASI, ses yüksekliği, frekans ve yankılardan elde edilen ipuçlarından sesin kaynağı hakkında çıkarımda bulunma yeteneği, öğrenilerek edinilen ve uygulandıkça geliştirilebilen bir yetenektir. Bu yetenek, bebeğin anne karnındaki ilk birkaç ayında gelişir ve gelişimini sürdürür. Başımız büyürken kulaklarımız arasındaki mesafe artar, sol taraftan doğrudan gelen sesin sol kulağa ulaştıktan sonra sağ kulağa geçiş süresi de onunla birlikte artar (Şekil 5.19). Beyin bebeklik sırasında yaşanan bu değişime ayak uydurmak zorunda kalır. Yaşını aldıkça çoğu insan bir miktar işitme kaybı yaşar. Bu kayıp asimetrikse, iki kulak arasındaki ses yüksekliği farkı değişir ve zihinsel bir ayarlamaya ihtiyaç duyulur. İşitme kaybı genel-



Şekil 5.19 Buradaki bebeğin başı annesinin başının yarısı büyüklüğünde. Bebek büyürken iki kulağına ulaşan seslerin zaman farklarının yorumunu ve bu seslerin zaman farklarının ses kaynağının lokasyonu konusundaki anlamını sürekli yeniden uyarlamak zorunda kalacak. Seslerin nereden geliyormuş gibi "göründükleri" ve kulağa ulaşan ses dalgalarının hareket ettikçe nasıl değiştiği bilgisi ona bu ayarlamada yardımcı olacaktır.

de yavaş gelişir, bu nedenle doğru bir ses lokasyonu algısını muhafaza etmek için yapılan ayarlamaların farkına varmayız.

Az bir alıştırmayla "yeni" kulaklarla sesin yerini belirlemeyi öğrenebiliriz de. John van Opstal ve Nijmegen Üniversitesi'ndeki ekibi, gerçekleştirdikleri bir deneyde insan deneklerin dış kulaklarına birer kalıp taktılar.[2] Takılan kalıplar dış kulakların şeklini değiştiriyor, böylece deneklerin alıştıklarından farklı bir spektral filtreleme örüntüsü deneyimlemelerine neden oluyordu. Denekler bu kalıpları altı hafta boyunca sabahtan akşama kadar taktılar, düzenli aralıklarla laboratuvara gidip seslerin yerini algılama yeteneklerini ölçtürdüler (Şekil 5.20). Araştırmacılar birkaç hafta sonra deneklerin seslerin yerlerini belirlemeyi yeniden öğrendiklerini gördüler. Deneyin sonunda denekler bu "yeni" kulaklarını neredeyse eski kulakları kadar iyi kullanabiliyorlardı.

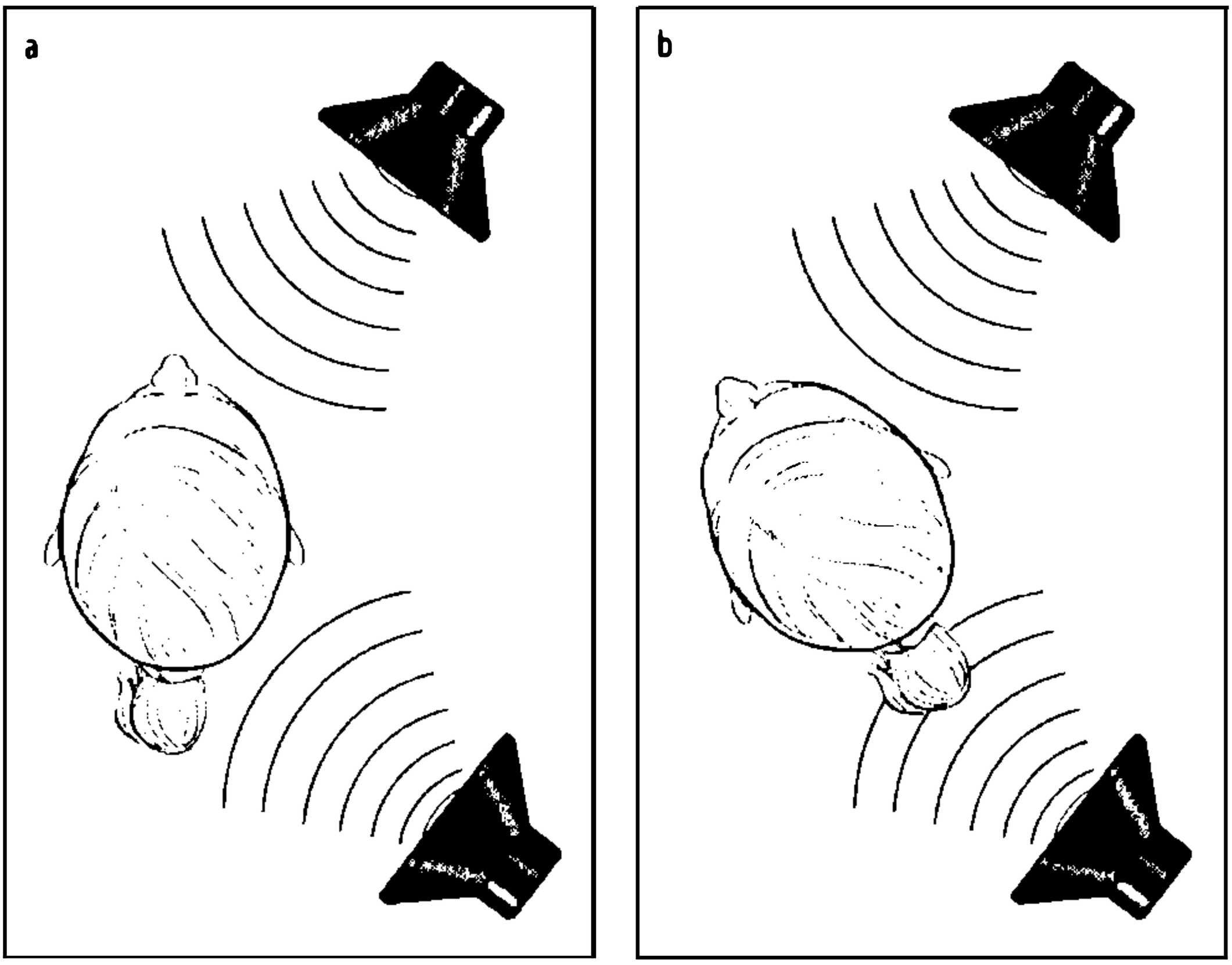


Şekil 5.20 Nijmegen Üniversitesi'nde yapılan bir araştırmada, deneklerin dış kulaklarına spektral ipuçlarını değiştiren bir kalıp takıldı ve denekler bu kalıpları altı hafta boyunca kullandılar. Denekler zaman içinde bu "yeni" kulaklarıyla seslerin yerini doğru biçimde belirlemeyi öğrendiler.

Peki ama "doğru" cevabın ne olduğunu nasıl anlamışlardı? Ses zamanlamasını, ses yüksekliğini veya kulaklarınızdan gelen spektral bilgileri nasıl yorumlayacağınızdan emin değilseniz, yorumunuzun doğru olduğunu anlamanıza ne yardım eder? İki tür geribildirimin önemli olduğu düşünülüyor: kendi hareketleriniz ve görme duyunuz.

Başınızı (ve kulaklarınızı) hareket ettirdiğinizde, zaman farkları, ses yüksekliği farkları ve spektral ipuçları değişir. Hareketle nasıl değiştiklerini gözlemlemek, bunların mekân içindeki konumlarla olan ilişkilerinin ortaya çıkmasını sağlayabilir. Karışıklık konisini ele alalım mesela: Sesin sağ kulağınızın civarından geldiğini, ama önden mi arkadan mı geldiğinden emin olmadığınızı farz edelim. Ses önden geliyorsa, başınızı sola çevirdiğinizde sağ tarafa (kulaklarınıza göre) kayacaktır (Şekil 5.21). Arkadan geliyorsa, ses kulağınızın orta çizgisine yaklaşacaktır. Başınızı sese doğru veya sesten uzağa çevirdiğinizde kulaklar arası zamanlama ve ses yüksekliği farklılıklarının artması veya azalması, sesin önden mi arkadan mı geldiğini belirlemenize yardımcı olur.

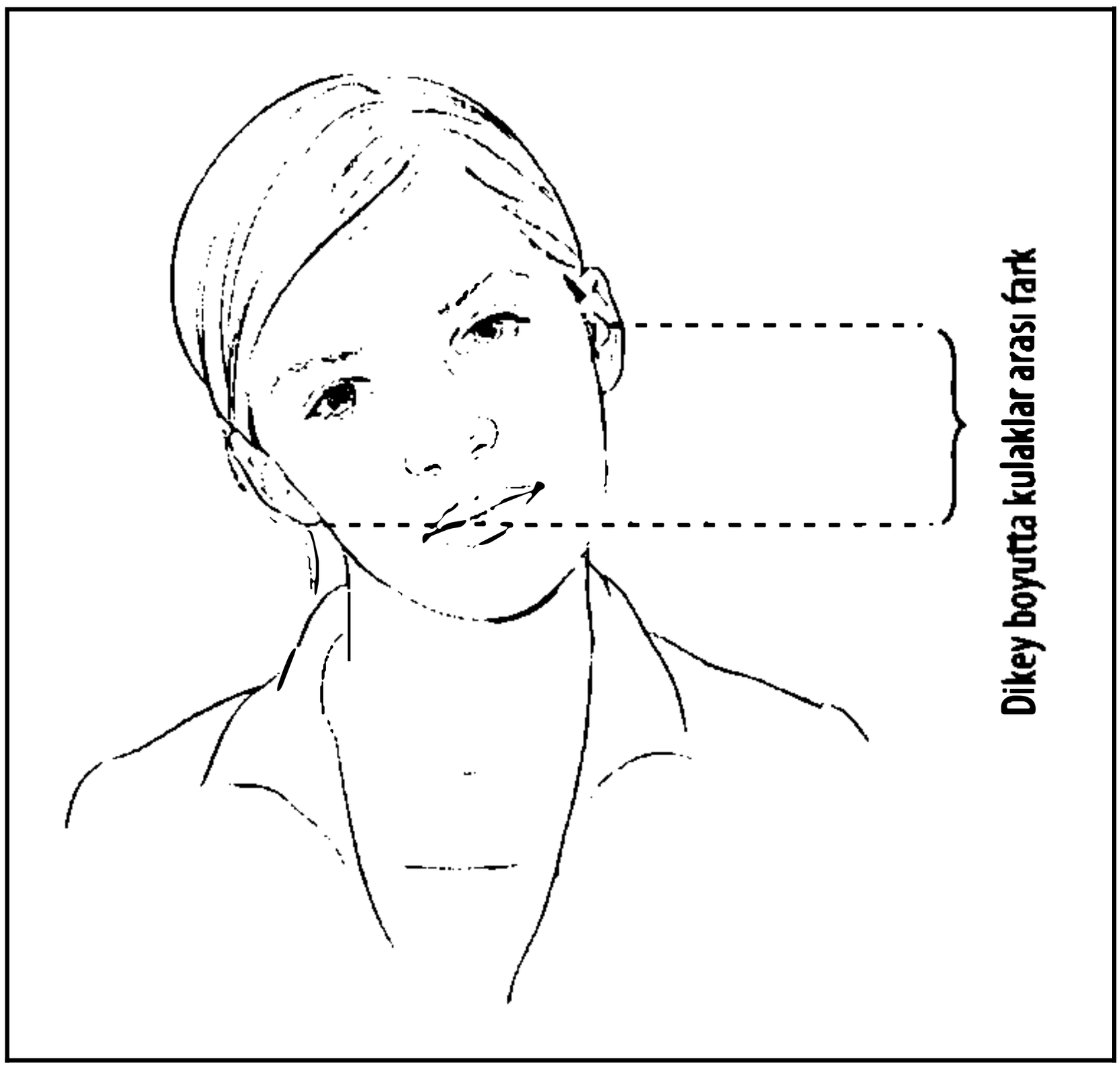
Benzer şekilde, başı hafifçe yana eğmek de dikey boyuttaki belirsizliğin giderilmesine yardımcı olur. Başınızı yana eğdiğinizde kulaklar arasındaki ekseni de eğmiş olursunuz ve gerçek dikey lokasyonda oluşan farklar, iki kulağın zamanlama ve ses yüksekliğin-



Şekil 5.21 Başınızı çevirmek ön-arka belirsizliğini gidermenize yardımcı olur. Örneğin, *a*'da iki ses de yaklaşık aynı kulaklar arası zamanlama ve ses yüksekliği farklılıkları yaratır. Kişi başını sola (*b*) çevirirse, önde ve sağdaki sesler için kulaklar arası zamanlama ve ses yüksekliği farkı artarken, arkada ve sağdaki sesler için azalır. Başınızı çevirirken sesin nasıl değiştiğini dinlemek bu belirsizliğin çözümünde size yardımcı olabilir.

de (bir miktar) farka neden olur (Şekil 5.22). Elbette, bütün bunları yapabilmesi için beyninizin başınızı ne kadar eğdiğinizi bilmesi gerekir! Sesin yerini belirleme süreci, 3. Bölüm'de ele aldığımız vücut konumu algınızı da içerir.

Ses lokalizasyon ipuçlarını değerlendirmenin bir yolu da görme duyunuzu içerir. İnsan duyduğu sesi çıkarabilecek bir şey gördüğünde, sesin gördüğü o nesneden geldiğini düşünmeye meyyaldir; bu yanılsama, sesin yerini gözle yakalama olarak bilinir. Vantriloklar insanlardaki bu eğilimden bin yıldır yararlanıyorlar. "Vantrilok" kelimesi, "karından konuşmak" demek olan Latince bir sözcükten gelir. Vantrilokluk antik Yunan'a kadar uzanan bir uygulamadır; Delfi Kâhini'nin de vantrilokluktan yararlandığı söylenir. Vantrilokluk daha yakın bir geçmişte, vodvil döneminde, özellikle Edgar Bergen'la popüler hale geldi. Shari Lewis gibi komedyenler 1950'lerde van-



Şekil 5.22 Benzer şekilde, başınızı bir tarafa eğmek, dikey boyutta kulaklar arası zamanlamada (ve belki de ses yüksekliğinde) küçük bir farklılık yaratarak sesin dikey lokasyonu hakkında bilgi edinmenizi sağlayabilir.

trilokluğu televizyona taşıdılar; Jeff Dunham ve Nina Conti gibi günümüz vantriloklarının icralarını YouTube'da bulabilirsiniz.

Bir zamanlar vantrilokların seslerini kuklalarına "fırlattıkları" düşünülürdü. Elbette fiziksel olarak böyle bir şey mümkün değildir. Ses kuklacıdan gelir, ama kuklacı konuşan kişinin kendisi olduğunu gösteren görsel ipuçlarını gizler ve bu ipuçlarını kuklanın hareketleri üzerinde yoğunlaştırır. Kuklanın bir konuşmaya eşlik eder gibi ağzı oynar, başı ve kolları hareket eder. Bu sırada kuklacı mümkün olduğunca hareketsiz durur. Dudakları belli belirsiz oynar. Yüz ifadesi konuşan biri gibi değil de dinleyen biri gibidir (dikkat kesilmiştir, tepki verir ve yüzü kuklaya dönüktür). İzleyici sesin kuklacıdan değil kukladan geldiğine ikna edilir, bu nedenle izleyici sesin kuklanın bulunduğu yerden geldiğini düşünür.

Canlı bir vantrilok gösterisi izlememiş olabilirsiniz ama televizyon veya sinemada film izlediğinizde bu efekti deneyimlersiniz. Ses ekranın yanındaki hoparlörlerden geliyor olsa da, ekrandaki kişinin konuştuğunu gördüğünüzde sesi doğrudan o kişiden geliyormuş gibi

algılarsınız. Bir vantriloğu videodan izlediğinizde bu yanılsamayı iki kez yaşarsınız: Vantriloğun sesinin önce kendi ağzından sonra da kukladan çıktığını duyarsınız. Aslında hiçbiri doğru değildir!

Gözlerimizin bizi kandırmasının bir nedeni, normalde onlara güvenmek için iyi bir sebebimizin olmasıdır, çünkü birçok sese görünür şeyler eşlik eder. Birden fazla şey gördüğünüzde, beyniniz sesi hangisinin çıkardığını belirlemek zorundadır. Vantriloklar kanıtın gücünü kendi ağızlarından ziyade kuklaya yönlendirerek kuklaların aslında konuşmadığı bilgimizi alt ederler. Kuklanın hareketlerinin konuşmanın sesiyle eşzamanlı oluşu bu yanılsamayı destekler.

Pili zayıflamış duman dedektörü meselesine dönersek, görmek aslında doğru alarmı bulma sürecine engel olur. Yanlış odadaysanız, duman dedektörünün görüntüsünün "vantrilokluğu" doğru dedektörü bulduğunuzu sanmanıza neden olur. Görmek ancak pilin zayıfladığını ışık sinyaliyle bildiren dedektörlerde işe yarar.

Görmenin yarattığı etkiler hem güçlü hem kalıcı olabilir ve öyle anlaşılıyor ki sesin geldiği yeri belirlemeyi öğrenmemize katkıda bulunurlar. Stanford Üniversitesi'nden sinirbilimci Eric Knudsen ile ekibi bu ilkeye dair güçlü kanıtlar elde etmiştir. Knudsen ve çalışma arkadaşları, görsel sahnelerinin tamamen değiştirilmesinin peçeli baykuşları nasıl etkilediğini ve sesin yerini belirleme yeteneklerini üzerinde ne gibi etkiler yarattığını incelediler. Bunun için baykuşların gözlerine uygun büyüklükte prizma gözlükleri tasarladılar. Bu prizma gözlükleri George Stratton'ınkiler gibi görsel sahneyi değiştiriyordu ama çok fazla değil. Bu gözlükler görsel sahneyi ters çevirmiyor, hafifçe bir tarafa kaydırıyordu. Baykuşlar yeni görsel sahnelerine uyum sağlama konusunda Stratton kadar esnek değillerdi ama yavrular sesin yerini belirleme yeteneklerinde değişiklik yapmışlardı (gözlükler işitsel ipuçlarını etkilemediği halde). Başlarının büyüklüğü değişmeyen yetişkin baykuşlar ise görme duyularındaki bu değişiklikten daha az etkilenmişti. Ama deney sırasında imkânını bulup avlanmaya çalıştıklarında bu değişikliğin yetişkin baykuşları da etkilediği görülmüştü; bu durum görme ile hareketlerin birbiriyle uyum içinde çalıştığını gösteriyor.[3]

Yakın zamanlarda lisansüstü öğrencim Daniel Pages'ın gerçekleştirdiği bir araştırma görme, ses ve hareket arasında bir bağ olduğu

görüşünü destekliyor.[4] Biz deneyimizde insanlara (veya maymunlara) prizma gözlükler takmak yerine, mekân içinde biraz farklı yerlerde görsel ve işitsel uyaranlar sunduk sadece. Sonra deneklerin, görsel uyaranlar olmadan sunulan seslerin yerini ne ölçüde doğru belirlediklerini test ettik (Davis'teki California Üniversitesi öğretim üyelerinden sinirbilimci Gregg Recanzone'nin *vantrilokluk sonrası efekti* olarak adlandırdığı paradigma).[5] Görsel-işitsel denemelerde görmenin en kalıcı etkilerinin, görsel uyaran sese tepki olarak verilen göz hareketi gerçekleştikten *sonra* (yani denekler önce tahminde bulunup gözlerini o yöne çevirdikten sonra) sunulduğunda ortaya çıktığını bulguladık. Bir sesin karşıdan geldiğini düşünüyorsanız ama onun hemen sağında sesin oradan geldiği izlenimi veren bir görsel uyaran beliriyorsa, zamanlama ve seviye farklılıkları ile mekân içindeki konum arasında kurduğunuz uygunluk ilişkisinin geçersiz olduğuna hükmeder ve sonraki tahminlerinizin daha doğru olması için tepkinizi yeniden ayarlarsınız.

Bu bölümde buraya kadar sesin ne olduğunu, kulaklarınızın sesi nasıl saptadığını ve sesin lokasyonunun çeşitli ipuçlarıyla (sesin kendisi, vücudun konumuyla ilgili görsel veriler ve konum bilgisi) nasıl ortaya çıkarıldığını gördük. Ama beynin işitsel bilgileri nasıl kodladığı konusunu henüz incelemedik. 4. Bölüm'de haritaların beyindeki bilgileri düzenlemede önemli mekanizmalar olduğunu gördük. Bu bölümün kalan kısmında, mekânsal *olmayan* bilgiler için kullanılan bir çeşit işitsel haritayı inceleyeceğiz ve bu haritanın kulak proteziyle işitme yeteneğinin yeniden kazanılmasında ne kadar önemli bir yeri olduğunu göreceğiz. Sonra, 6. Bölüm'de haritalara alternatif bir yapıdan, beynin bazı işitsel ve hareketle ilişkili mekânsal sinyallerde kullandığı farklı bir kodlama biçiminden söz edeceğim.

Daha önce gördüğümüz gibi, görsel ve somatosensori haritalar, fotoreseptörler ile dokunma reseptörlerinin topoğrafik düzeninden ortaya çıkar. Kokleadaki reseptörlerin mekânsal düzenleri ses lokasyonunun benzer bir imgesini oluşturamaz ama ses hakkında (sesin frekansı hakkında) bilgi verir.

Ses frekansına olan hassasiyet kokleada rezonans biçiminde kendini gösterir. Rezonans, bir sistemin bazı frekanslarda diğer fre-

kanslardan daha güçlü salınma eğilimi göstermesidir. Örneğin gitardaki her tel farklı bir frekansta rezonans üretir. Buna bir örnek de salıncaklardır. Uzun ipli bir salıncak yavaş salınırken kısa ipli bir salıncak daha hızlı hareketlerle salınır. Salıncağın hareketini azami seviyeye getirmek için bacaklarınızı salınmanın rezonansıyla çakışacak bir tempoyla gererek itmeniz veya birilerinin sizi o tempoda sallaması gerekir.

Memelilerde baziler zar (tüy hücrelerini tutan esnek doku), uzunluğu oranında bir rezonans gradyanına sahiptir. Baziler zarın her bölümü bazı ses frekanslarında diğerlerine oranla daha güçlü biçimde salınır ve hangi frekansın en güçlü salınımı üreteceği baziler zar boyunca değişiklik gösterir. Tabanı, sallanma hareketinin en kısa gerçekleştiği bölümüdür; hızlı ve en yüksek frekansta en güçlü biçimde salınır. Baziler zarın bu kısmı çok serttir, bir kemanın veya gitarın en gergin teli gibidir. Baziler zar, kokleanın tepe noktasına yakın yerinde daha esnektir (bas gitarın telleri gibi) ve burası daha düşük frekanslı seslerde en güçlü biçimde salınır. Sertlikteki bu varyasyon ve onunla birlikte ses frekansı hassasiyetindeki varyasyonlar, sesin frekans içeriğinden bir nöral haritanın oluşmasını sağlar. Baziler zarın bir bölgesindeki tüy hücreleri şiddetle ateşleniyorsa (yani eylem potansiyelleri üretiyorsa), bu o sesin baziler zar üzerindeki o bölgenin en güçlü biçimde salınmasına yol açan frekansta enerjiye sahip olduğu anlamına gelir.

Bir çeşit işitme protezi olan koklea implantları, bu ses frekansı haritasından yararlanarak işitme kaybı olan bazı hastaların duyma yeteneklerini yeniden kazanmalarını sağlar. Bu hastalarda tüy hücreleri ölüdür, dolayısıyla mekanik hareketi nöral aktiviteye dönüştüren nöronlar işlevsiz kalmıştır. Bu nöronların girdileri olmazsa işitme sinir lifleri sessizleşir ve beynin sesi algılaması imkânsız hale gelir. Koklea implantları, kokleanın içine yerleştirilmiş bir dizi elektrotun yardımıyla kayıp tüy hücrelerini devredışı bırakırlar ve tüy hücrelerinin kaybolan işlevini üzerlerine alarak işitme sinirinin nöronlarını elektriksel olarak aktive ederler.

Bu elektrotların verdiği uyaranlar, işitme sinirinin normalde sese verdiği tepkiyi taklit edecek şekilde tasarlanmıştır. Minyatür bir bilgisayar gelen sesleri analiz ederek (Fourier analizinden yararlana-

rak) ortamda hangi frekansların olduğunu belirler. Sonra bu frekanslara duyarlı elektrotları harekete geçirir. Ortaya çıkan uyaran, yüksek frekanslı seslerde kokleanın tabanına, düşük frekanslı seslerdeyse kokleanın tepe noktasının yakınına gönderilir. Bu örüntünün doğru biçimde oluşturulması, hastanın konuşmayı anlayabilmesi açısından temel öneme sahiptir. *d* ile *t* veya *a* ile *e* arasındaki fark, farklı zamanlarda farklı miktardaki farklı frekanslar anlamına gelir. Elektrot aktivasyon örüntüsü bunu taklit eder (pek mükemmel sayılmayacak şekilde gerçi; hastaların uyaranın başlattığı aktivite örüntülerini yorumlamayı yeniden öğrenmeleri gerekir).

İşitme sinirinden taşınan ses frekansı haritası, beyinde gerçekleşen birçok işitsel işlemden geçer; 4. Bölüm'de görme ve dokunma konusunu işlerken gördüğümüz işleımleri andıran işlemlerdir bunlar. Ama işitme sistemi mekânsal olmayan bir şey için harita kullanıyorsa, mekânsal bilgi karşısında ne yapar? 6. Bölüm'de bu konuyu inceleyeceğiz.

6

Harita ve Sayaçlar Eşliğinde Hareket

SİNİRBİLİMDE önemli bir kavrama girmiş bulunuyoruz: *temsil* kavramına. Nöronların belli bir uyarana nasıl tepki verdiklerinden veya beyinde nasıl organize olduklarından söz ederken aslında onların bilgiyi nasıl temsil ettiğinden söz etmiş oluruz.

Çevremiz farklı temsil türleriyle doludur. Alfabedeki harfler seslerin temsillerini oluşturur, diğer harflerle birleştiklerinde sözcükleri temsil ederler. Trafik ışıkları verdikleri sinyallerle bir kavşağa girmenin güvenli olup olmadığını anlamamızı sağlar. Aynı bilgi çoğunlukla birden fazla şekilde temsil edilir. Örneğin "anne" kavramı çeşitli dillerdeki seslerle ve sayfa üzerindeki bir grup yazılı (her dilde farklı) sembollerle temsil edilebildiği gibi tamamen farklı bir yöntemle, bir işaret dilinin el kol hareketleriyle de temsil edilebilir. Bu temsillerin her biri aynı şeyin farklı biçimde kodlanmasıdır.

Beynin bilgiyi kodlama ve manipüle etme yollarından birinden, nöral haritadan söz ettik. Bu bölümde, haritaların ne işe yaradığını araştıracak ve onların bazı sınırları olduğunu göreceğiz. Beynin benim *sayaç* olarak adlandırdığım alternatif bir kodlama biçimine sahip olduğunu keşfedeceğiz. Bir haritada, nöral aktivitenin *yeri* bilgiyi temsil eder, bir sayaçta ise aktivitenin *miktarı* bilgiyi temsil eder.

Haritalar ile sayaçlar arasındaki kavram farklılıklarını tasvir etmek için bilgisayar, televizyon, cep telefonu gibi modern elektronik cihazlarla (her türlü elektronik sinyal veren makineyle) bir analoji

geliştirelim. Bilgisayarların ve onlara benzeyen birçok elektronik cihazın kullandığı temsiller dijital ve analog olmak üzere iki çeşittir ve beynin haritaları ile sayaçlarına benzerler.

Önce dijital kodlamayı ele alalım. Böyle bir temsilde kodlanan bilgi parçasının matematiksel bir nicelik, yani bir sayı olduğunu düşünelim. Dijital kodda, bir sayı bilgisayarda, mantık geçitleri oluşturacak şekilde düzenlenmiş bir dizi transistör tarafından temsil edilir. Her mantık geçidi iki durumdan biri olabilir ve bu geçitler bir araya getirilerek, sayıyı ikinin kuvvetleri şeklinde bileşenlerine ayırmak suretiyle birçok değeri temsil etmeleri sağlanabilir (bkz. Şekil 6.1).

0	0	1	1	1	0	0	0

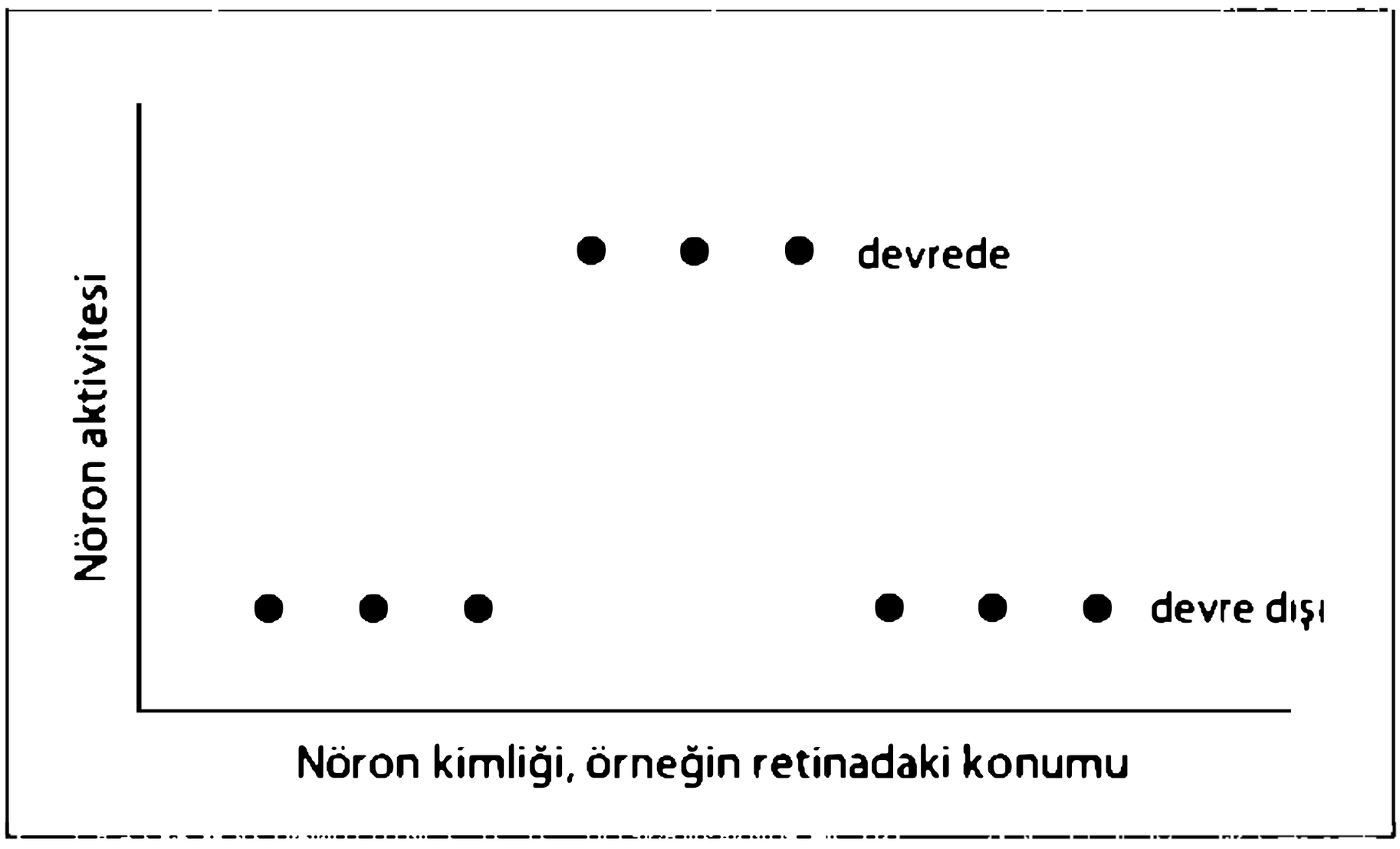
Şekil 6.1 Bir dijital kodun sıfır ve birleri. Bu örnek $2^3 + 2^4 + 2^5$'e veya 56'ya karşılık gelir.

Burada en soldaki hane veya bit, 128'in (2^7) varlığını veya yokluğunu, sonraki bit 64'ün (2^6) varlığını veya yokluğunu vb. belirtir. Bu içeriklerin toplamı ve sayıların on tabanına göre temsili şu şekildedir:

(0 x 128) + (0 x 64) + (1 x 32) + (1 x 16) + (1 x 8) + (0 x 4) + (0 x 2) + (0 x 1) veya 32 + 16 + 8 veya 56.

Beynin bilgi haritalarını bir dijital kodun nöral versiyonu gibi düşünebiliriz. İki kodda da hangi elemanların "devrede" olduğu önemlidir. Dijital kodda bu elemanlar transistörlerin oluşturduğu mantık geçitleridir. Bir beyin haritasında ise kodun elemanlarını nöronlar oluşturur. Beyin haritası, bir çeşit "hangi nöronlar devrede" kodudur, Şekil 6.2'dekine benzer bir şeydir.

Dijital kodlarda ve haritalarda her elemanın işgal ettiği yerin bir anlamı vardır. Bir mantık geçidi grubu içinde belli bir yerdeki bir veya sıfır, ikinin belli bir kuvvetinin varlığına veya yokluğuna işaret eder. Bir nöron beynin görsel haritalarında ateşleme yapıyorsa, gör-



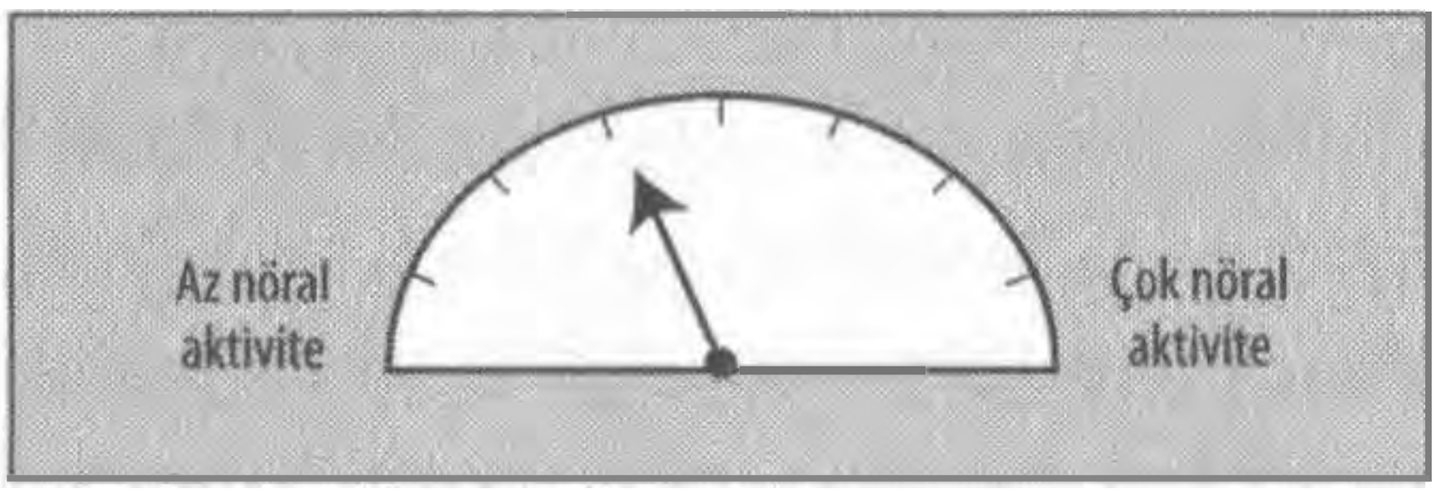
Şekil 6.2 Beynin haritalarını dijital kod olarak düşünebiliriz. Aktivite örüntüsü, görsel sahneyle ilgili bilgiyi kodlar.

sel sahnedeki belli bir noktada bir görsel uyaran var demektir. Ateşleme yapmıyorsa, o noktada görsel bir uyaran yok demektir.

Bu çok basit bir açıklama elbette, zira nöronlar ikili değil kademeli tepkiler verirler. Yani nöronlar basitçe "devrede" veya "devre dışı" değildirler, çok sayıda eylem potansiyeli üretebilirler. Bu nitelikleri dijitalden çok analog sinyal üretimini andırır. Analog kodda, bazı sinyallerin büyüklüğü kodlanacak bilgiyle birlikte sürekli artar. Analog çalışan elektronik bir cihazda sinyal genellikle voltajdır ama iki değerle (0 ve 5 voltla örneğin) sınırlı değildir, voltaj seviyesi düzgün ve sürekli bir şekilde artabilir. Örneğin, yedi sayısıyla belirtilen niceliksel bir değer 7 volt, üç sayısıyla belirtilen niceliksel değer 3 volt vb. sinyallerle temsil edilebilir. Bu kodlama türünde değer ve o değeri kodlayan sinyal birlikte düzgün ve düzenli biçimde, hatta aynı oranda değişir. Hayalinizde üzerinde ibresi olan bir sayaç canlandırın: İbrenin saptığı nokta, ölçülen şeyin miktarını verir (Şekil 6.3).

Nöral aktivite analog kodlamada çok dinamik bir seyir gösterir, eylem potansiyelleri saniyede sıfırdan yüzlü değerlere kadar sürekli değişir. Dolayısıyla bir nöron popülasyonu aynı anda iki tür koda dahil olabilir – hangi nöronların devrede olduğunu gösteren kod ile hangi güçte devrede olduklarını gösteren koda.

Bu iki kod türü genelde birbirinden farklı şeyler belirtir. Görmede, bir nöronun ateşleme miktarı ışığın parlaklığıyla (veya sönüklü-

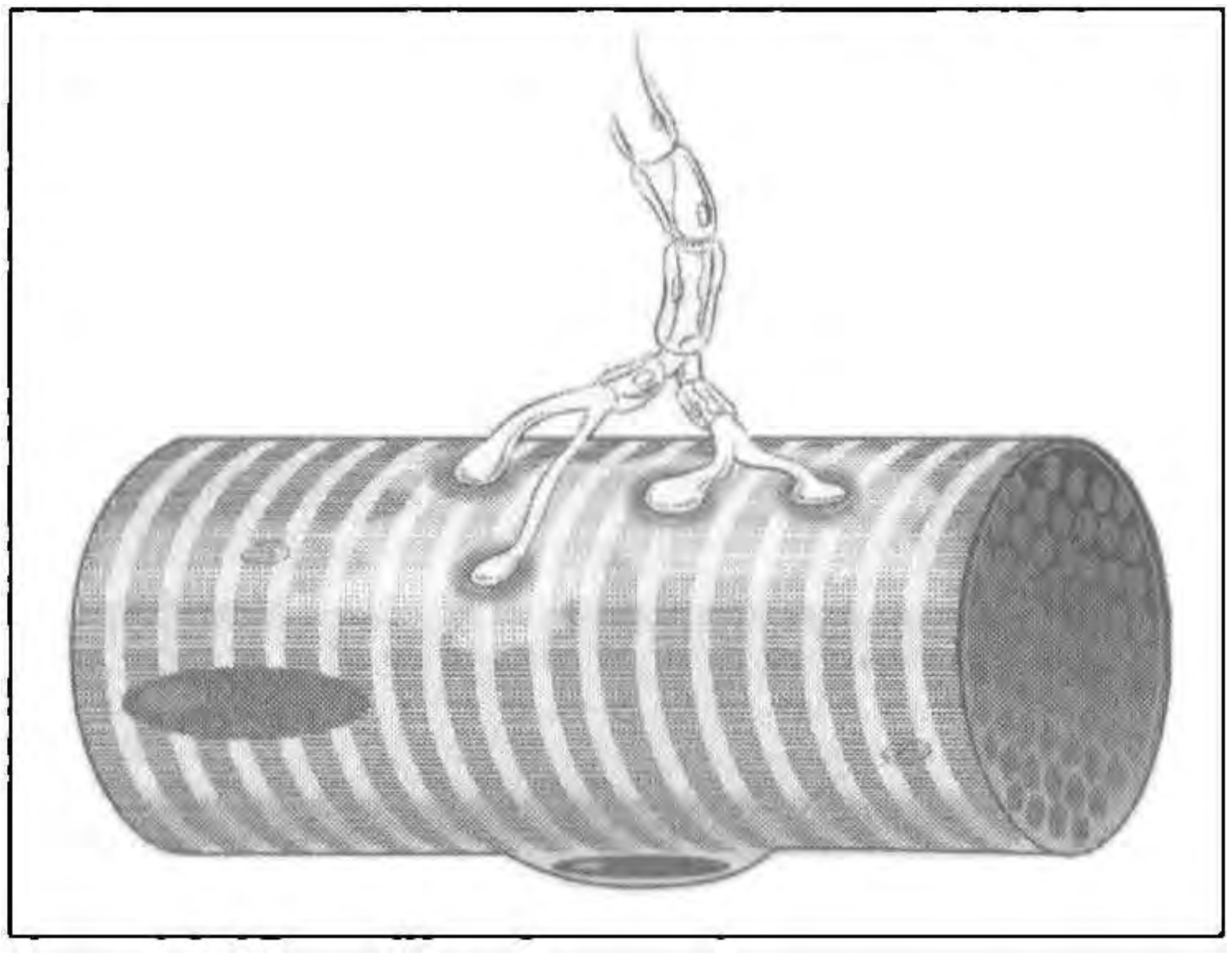


Şekil 6.3 Beyin bir şeyi temsil etmek için harita yerine sayaç kullandığında, bilginin kodlanması, hangi nöronların tepki verdiğinden ziyade tekil nöronların ateşleme örüntüleri (az mı yoksa çok mu faal oldukları) üzerinden olacaktır.

ğüyle) ilgilidir. Daha fazla foton daha fazla miktarda fotopigment molekülünü etkileyerek zarın elektrik potansiyeli üzerinde daha fazla etkiye neden olur. Bu da daha fazla sayıda nörotransmitter molekülünde değişime ve komuta zincirinin en uzak halkalarındaki nöronların aktivite seviyesi üzerinde daha fazla etkiye neden olur. Ay yerine güneşe (çok farklı parlaklık seviyelerine sahip iki görsel nesneye) bakmak nöronların tepki güçlerinde farklılığa neden olur. Keza dokunmada, dokunma reseptörüne uygulanan baskının miktarı, reseptörün tepkisini aynı oranda etkiler. Birinin elini sıktığınızda dokunma nöronlarınız şiddetle tepki verecektir. Nazik bir okşayış ise beyninizin dokunma yollarında hafif bir tepkiyle sonuçlanacaktır.

Bu iki vakada, nöral sayaçlar mekânsal olmayan bilgiyi kodlar. Başka durumlarda ise nöral ateşleme hızları mekânla ilgili bilgiyi yansıtır. Örneğin, beynimiz vücudumuzun mekân içindeki hareketlerini kontrol etmede analog kodlamadan yararlanır. Frizbiyi yakalamak üzere elinizi uzatmak, devrilmiş bir ağaç gövdesi üzerinden atlamak üzere bacağınızı kaldırmak, tango yapmak, bunların hepsi beynin analog sinyalleri kullanmasına bağlıdır.

Hareketler analogdur, çünkü hareketin süresi ve hızı bir kasın kasılma gücüyle birlikte değişir. Beyniniz kas kasılmalarını, kas lifleriyle sinaps oluşturan nöronlar aracılığıyla kontrol eder (Şekil 6.4). *Motor nöronlar* olarak adlandırılan nöronlar tarafından salınan nörotransmitter molekülleri, kas lifinin yüzeyindeki reseptörler tarafından algılanır ve bu reseptörler kas lifinin kasılmasına neden olur. Motor nöronun saldığı nörotransmitter miktarı, kasılmanın derecesini, dolayısıyla da uzvun nereye kadar ve hangi hızda hareket edeceğini belirler.



Şekil 6.4 Şekilde görüldüğü gibi, beyin, kasları nöronların kas lifleriyle kurdukları sinapslar üzerinden kontrol eder. Motor nöron olarak adlandırılan nöron aktifse, nörotransmitter molekülleri bu sinapslara gönderilir ve kas lifleri üzerindeki reseptörlere bağlanır. Bu, kas lifinin kasılmasına neden olur. Kas lifinin kasılma miktarı ortamdaki nörotransmitter miktarıyla doğru orantılıdır.

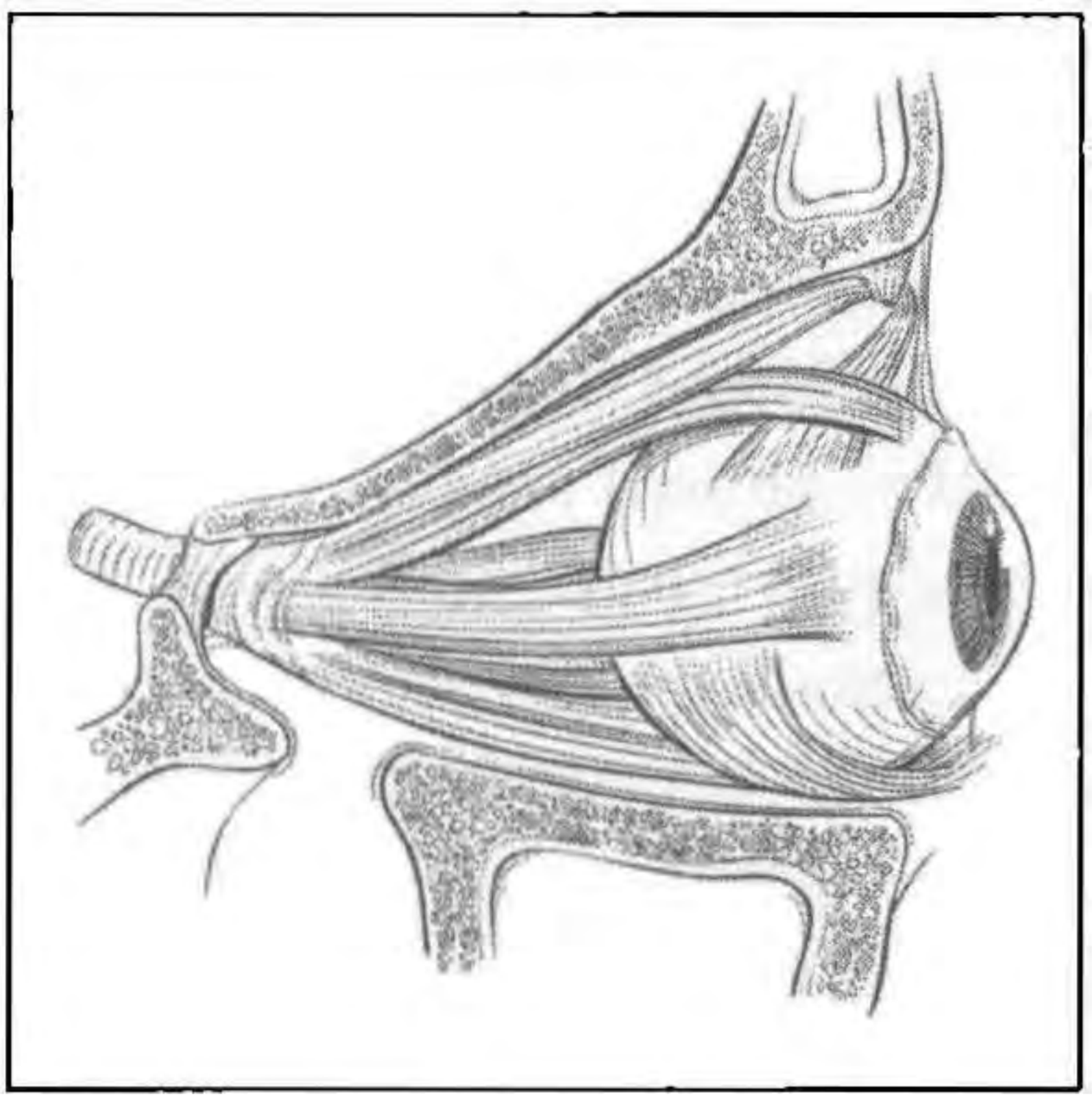
Birbirine çok benzeyen hareketlerde bile her hareket için ayrı bir kas grubu gerekseydi durum ne kadar farklı olurdu bir düşünelim. Öyle bir durumda kollarınızı örneğin sağa yedi santim hareket ettirmek için ayrı, on beş santim hareket ettirmek için ayrı, yirmi santim hareket ettirmek için ayrı kaslar gerekirdi. Bu durum, arabanızda farklı yolculuklar için, gitmek istediğiniz mesafeye göre farklı gaz pedalları olmasına benzer. Çok verimsiz bir çözüm! Bunun yerine, vücudun belli bir bölümünün belli yöndeki bütün hareketleri aynı kas lifi grubuyla gerçekleştirilir ve bu lifler vücudun belli bir bölümünü farklı miktarlarda hareket ettirmek için farklı güç ve sürelerde kasılır.

Burada yine haritalandırmadan yararlanılır ama daha çok vücudun hangi bölümünün hangi yönde hareket edeceğini belirlemek için. Bacaklarınız epikraniyal (kaşlarınızı kaldıran) kaslarınızın değil kuadrisepslerinizin kasılması sonucu hareket eder. Biseps ve triseps kaslarınız kolunuzu hareket ettirir ama zıt yönlerde. Kısaca belirtmek gerekirse, hangi aktif kas grubunun ne kadar kasıldığı, hangi vücut bölümünün ne yönde hareket edeceğini belirler, kasılma kuvveti ile süresi de hareketin hızını ve ölçüsünü.

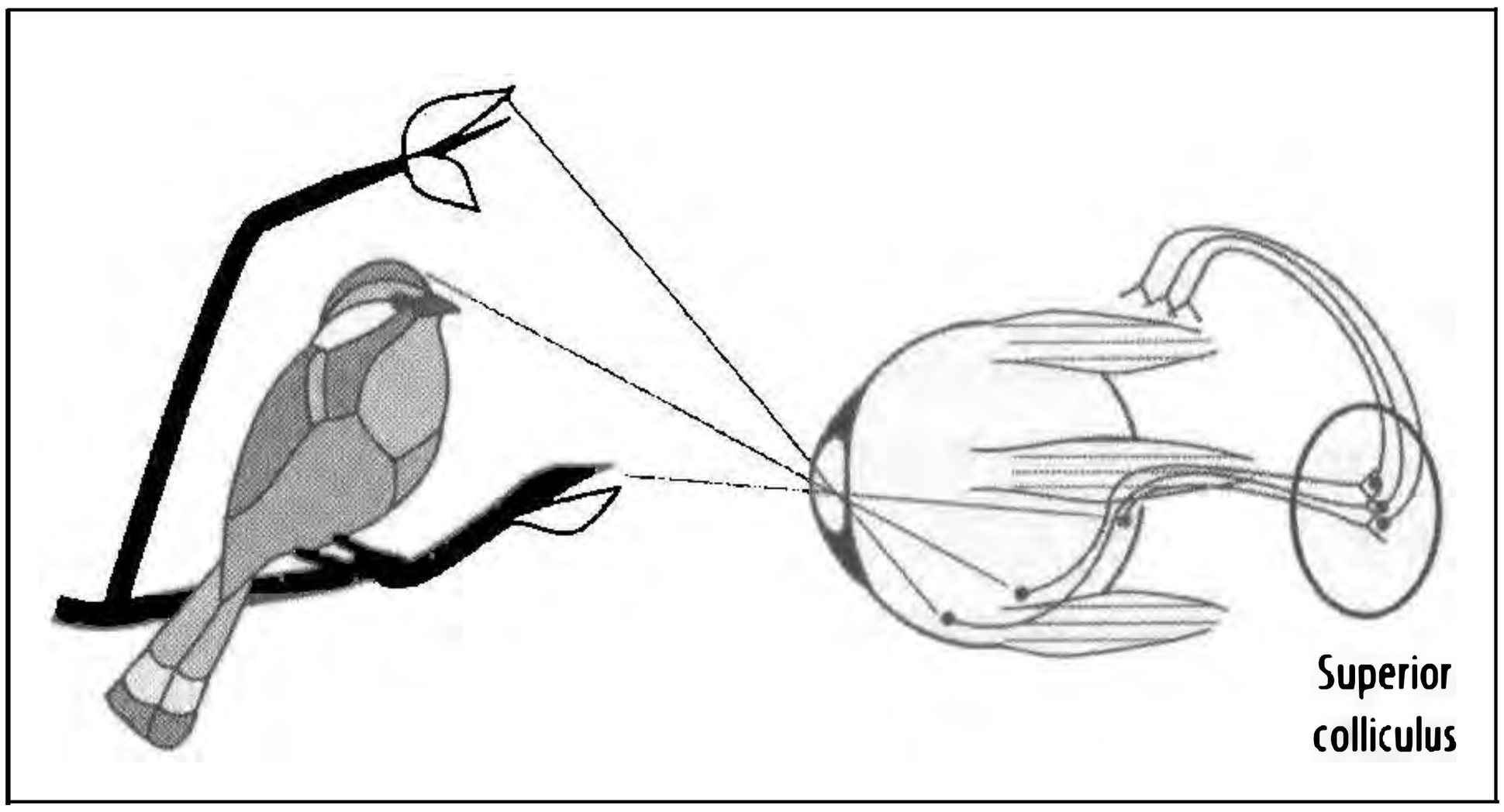
GÖRDÜĞÜNÜZ BİRİNE elinizle işaret ederken olduğu gibi, (ölçülmüş) bir hareket (haritalandırılmış) bir sensör olayının yardımıyla gerçekleştiğinde, beyin bu iki iç dilin yorumunu yapmak zorundadır. Bunun gibi haritadan sayaca doğru gerçekleşen dönüştürme işlemleri, dijitalden analoğa gerçekleşen dönüştürme işleminin beyindeki muadilidir.

Beynin bunu nasıl gerçekleştirdiğinin en iyi anlaşıldığı olay göz sekmeleridir (ilk kez 3. Bölüm'de sözünü ettiğimiz göz hareketleri). Sekmelerin amacının foveayı daha net görmek istediğimiz uyarana yönlendirmek olduğunu hatırlayalım. Sekmeler, foveayı ses kaynaklarına (adınızı söyleyen kişiyi aramak gibi) veya dokunsal uyaranlara (kolunuzu sokan bir sivrisineğe veya daha önce sözünü ettiğim deneydeki titreşen çubuklara) yönlendirebilirler. Ama çoğunlukla bakışımızı görebildiğimiz uyaranlara yönlendiririz. Bu sayfaya bakarken gözünüzün kenarından dışarıda uçan bir kuşu fark edebilirsiniz. Ondan sonra kuşun serçe mi yoksa çalıkuşu mu olduğuna bakmak için gözlerinizi hemen pencereye çevirebilirsiniz.

Göz ucuyla gördüğünüz kuşa *hangi* fotoreseptör nöronlarının tepki verdiğinin bilgisi, beyninize *nereye* bakılacağını söyler. Bu hareketi ekstraoküler kaslar (göze dışarıdan bağlı oldukları için bu adı almışlardır) kontrol eder (Şekil 6.5). Bu kasların ikisi gözü yatay hareket ettirirken, dördü gözü yukarı ve aşağı çekerek hareket ettirir



Şekil 6.5 Gözlerin hareketini sağlayan kaslar. Gözün dışına bağlı altı kas vardır. Bu kaslar üç çift halinde düzenlenmişlerdir. Bu kasların ortak hareketi gözü yatay ve dikey boyutlarda hareket ettirdiği gibi gözün hafifçe dönmesini de sağlar.



Şekil 6.6 Gözünüze takılan ilginç bir şeye daha yakından bakmak istediğinizde, gözünüzü foveayı bakmak istediğiniz noktaya odaklayacak şekilde hareket ettirirsiniz. Bunu yapmak için beyniniz, görsel imgenin haritasının gözleri hedefe doğrultmak için kasları ne kadar kasmak gerektiğini gösteren bir sayaca tercüme edildiği beyin bölgesini fotoreseptörlerin aktivite örüntüsüyle beslemek durumundadır. Örneğin kuşun imgesi retina üzerinde belli bir konumda yer alırken, farklı ağaç dallarının imgeleri başka konumlarda yer alır. Mekân içindeki bu farklı konumlara farklı fotoreseptörler tepki verir. Gözleri bu noktaların her birine hedeflemek için aynı göz kasının farklı miktarlarda kasılması gerekir. Gözleri doğru bir şekilde hareket ettirmek için görsel haritanın motor sayaca dönüştürülmesinde superior colliculus'un rol oynadığı düşünülüyor.

veya gözün dairesel hareketler yapmasını sağlar. Kuşun üzerindeki bulutlara veya kuşun altındaki dala bakma hareketi, dikey hareket sağlayan kasların farklı derecelerde kasılmasıyla gerçekleşir (Şekil 6.6). Sert kasıldığında gözler bulutlara, daha yumuşak kasıldığında ağacın dalına çevrilir. Okülomotor gaz pedalına hafif bir dokunuş ise gözleri asıl hedefe, yani kuşa yönlendirecektir.

Görme sırasında göz hareketlerine katkıda bulunan dijitalden analoğa dönüştürme işleminden *superior colliculus* adıyla bilinen beyin yapısının sorumlu olduğu düşünülüyor. Colliculus "tepe" anlamına gelen Latince bir sözcük. Beyin sapının (beynin omuriliğe sap gibi bağlanan bölümü) üst kısmında iki tepe dizisi bulunur. Alttaki tepeler, yani *inferior colliculi* duymadan sorumludur (altta bu tepelerden daha fazla vardır). Üstteki iki tepe, yani superior colliculi ise gözlerin bakacağı yere bakmasını sağlar.

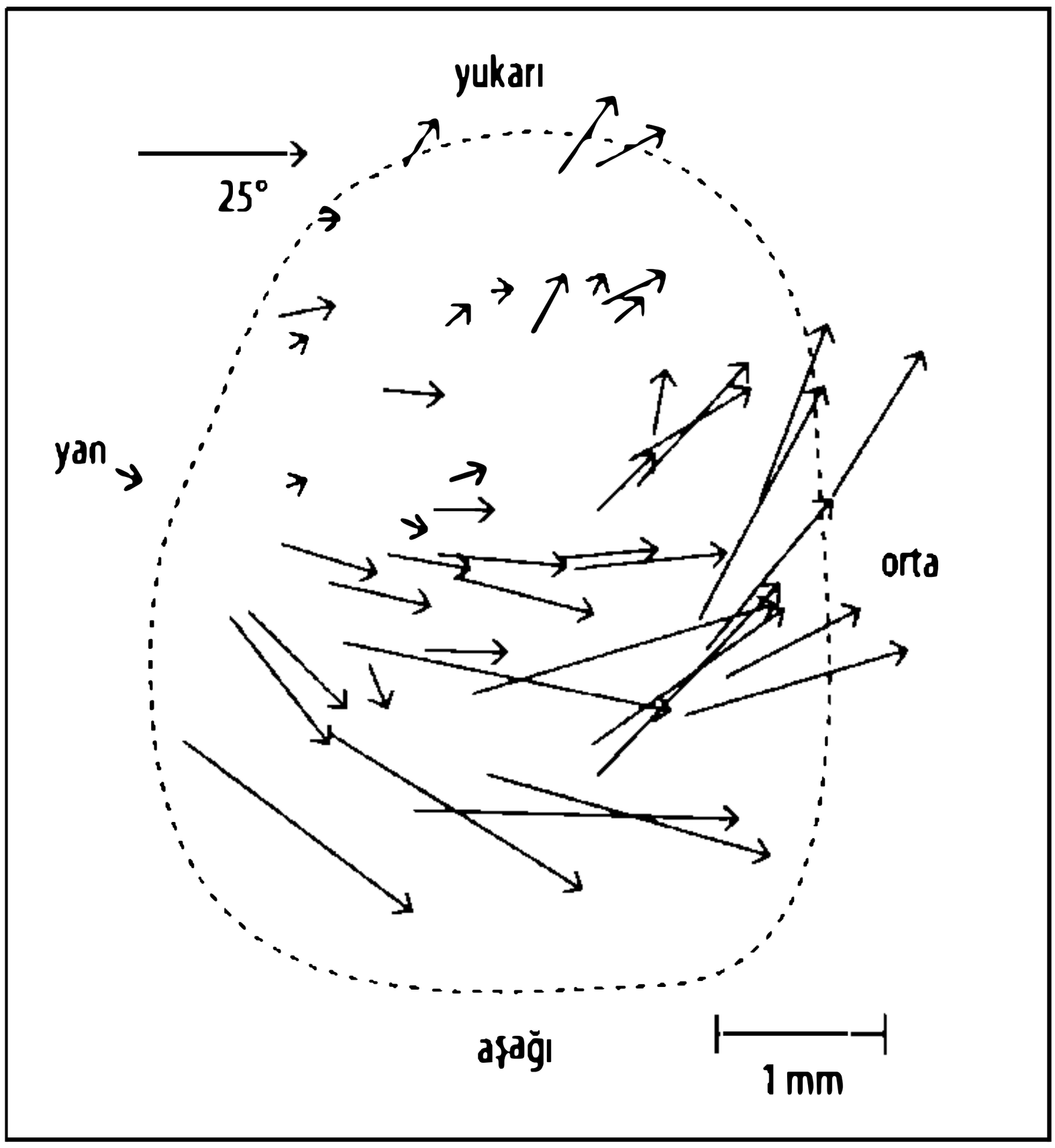
Superior colliculus, görme sisteminin ürettiği haritalar ile motor sistemde kullanılan sayaçlar arasında köprü vazifesi görür. Superior

colliculus nöronları, görme sisteminden gelen sinyalleri alır ve göz hareketlerini kontrol ederken bu sinyallerden yararlanır. Bu kontrol işini tuhaf bir haritadan, bir hareket haritasından (farklı yolculuklar için farklı gaz pedalları olan hayali arabamıza benzeyen bir harita!) yararlanarak yaparlar. Superior colliculus üzerinde farklı yerlerde bulunan nöronlar en şiddetli tepkiyi, gözler belli bir yöne ve uzunluğa (veya *vektöre*) doğru hareket ettirileceği zaman verirler. Komşu nöronlar benzer vektörleri tercih eder; ayrıca yapının tamamında (sol ve sağ colliculuslar dahil) bütün muhtemel hareket vektörlerinin "haritası çıkarılmış" gibidir.

Superior colliculusun elektrikle uyarılması gözlerin hareket etmesini sağlayarak (daha önce MT bölgesinde gördüğümüze benzer bir durum)* bu varsayımı destekler (Şekil 6.7). Hareketin yönü ve uzunluğu uyarının superior colliculusun *neresinde* gerçekleştirildiğine bağlıdır ve her iki taraftaki nöronların alıcı alanlarıyla eşleşir.[1] Superior colliculusun ön sol çeyreğinin uyarılması, maymunun gözünün sağa doğru kısa süreli sekmesine neden olur. Uyarının arka kısma doğru kaydırılması benzer ama daha uzun süreli bir göz hareketine yol açarken, başka bölgelerin uyarılması çeşitli yön ve büyüklükte göz hareketlerine neden olur. Superior colliculusun uyarılması sonucu başlayan hareketler, uyarılan bölgelerdeki nöronların alıcı alanlarıyla yakın bir uyum içindedir.

Superior colliculusun harita dilini sayaç diline çevirme konusunda aşağıdaki bölgelerle (kendisi ile kaslar arasında) nasıl bir ortaklık içinde olduğu pek bilinmiyor. İhtimallerden biri, beynin haritayı sayaca dönüştürme işleminin elektronikteki dijitalin analoğa dönüştürülmesi işlemine çok benzer biçimde gerçekleşiyor olabileceği yönünde. Bir mühendis, dijital kodla kodlanan bir niceliğin büyüklüğü oranında ve düzgün biçimde artan bir voltaj sinyali yaratmak için,

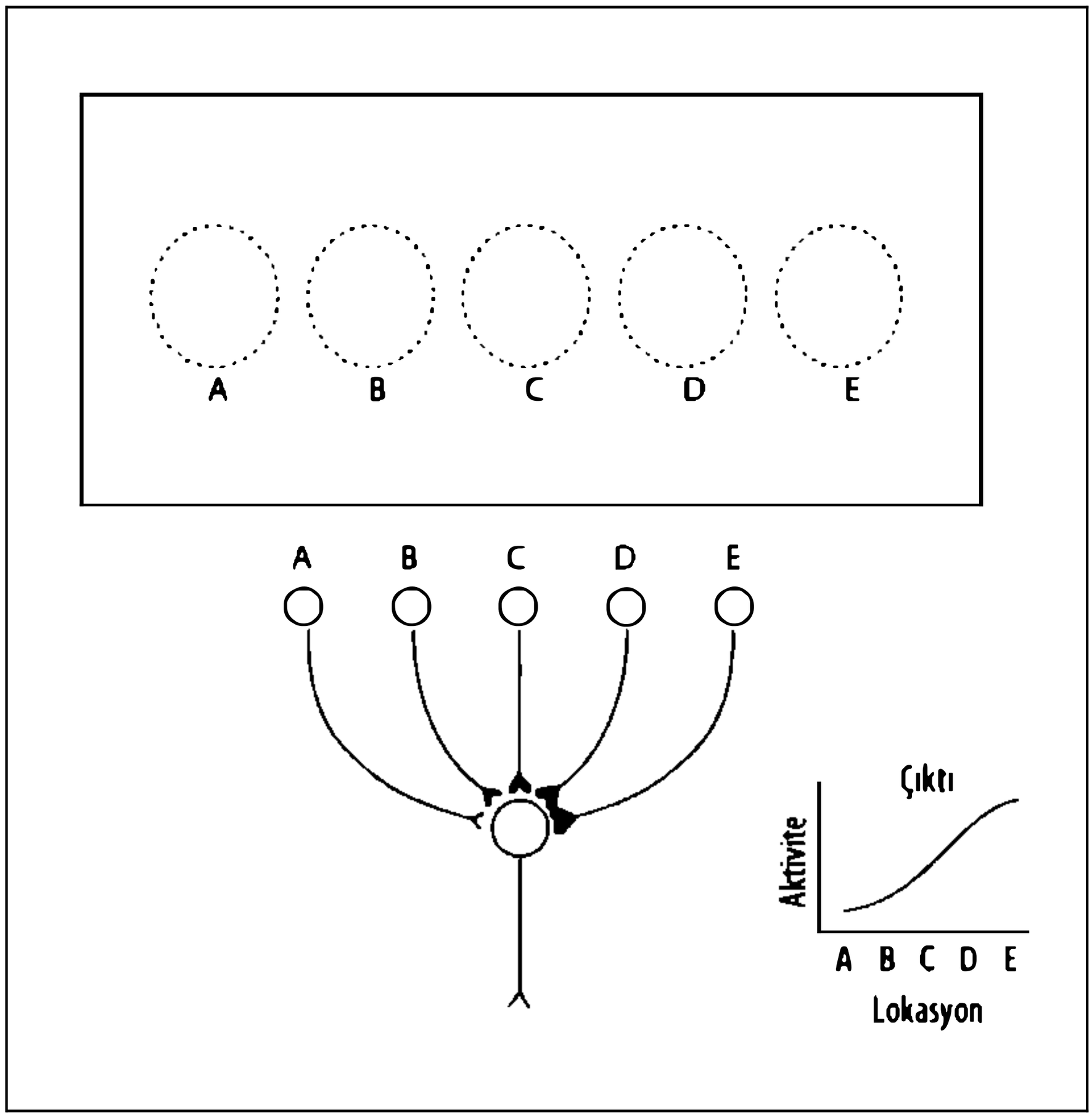
* Superior colliculus ile MT'nin uyarılması göz hareketlerine neden olmakla birlikte bu iki beyin bölgesi arasında önemli farklılıklar mevcuttur. MT daha çok görsel bir yapıdır ve bu bölgenin uyarılması çoğunlukla görsel hareket algısının değişmesi biçiminde bir etkiye neden olur, ki bu etki maymuna verilen göreve bağlı olarak çok farklı biçimlerde kendini gösterir. Superior colliculusun uyarılması ise, hayvanın yapıyor olabileceği görevden bağımsız olarak, belli bir sekmeli göz hareketinin doğrudan başlamasına neden olur.



Şekil 6.7 Superior colliculusun hareket haritası. Superior colliculusa uygulanan elektrik uyaranı gözlerin hareket etmesine neden olur. Gözlerin nereye doğru hareket edeceği uyarıcı elektrotun superior colliculusta nereye yerleştirildiğine bağlıdır. Sol superior colliculusun (şekildeki gibi) uyarılmasıyla tetiklenen hareket genelde gözleri sağdaki bölgelere, sağ tarafın uyarılması gözleri sola yönlendirir. Superior colliculusun ön tarafının uyarılması daha küçük hareketleri tetikler. Arka tarafın uyarılmasıyla ise daha büyük hareketler tetiklenir. Orta kısmına yakın yerlerin uyarılmasıyla hareketler yukarıya doğru gerçekleşirken, yan konumların uyarılması aşağı yöndeki hareketleri tetikler.

dijital kodun bitlerini oluşturan her bir mantık geçidini farklı amplifikatörlere bağlar. İkinin düşük kuvvetlerini bildiren bitler çok az büyür; ikinin daha yüksek kuvvetlerine karşılık gelen bitler ise çok büyür. Bu ölçülmüş sinyaller sonra toplanarak istenen nicelikle birlikte ölçülen bir voltaj sinyali elde edilir.

Superior colliculustaki nöronlar da buna benzer şeyler yapıyor olabilir (Şekil 6.8).[2] Bir nöronun aktivitesi, bu temsilde bulunduğu yere (dolayısıyla da alıcı alanına) bağlı olarak bazı ağırlık faktörleriyle ölçülebilir. Daha büyük göz sekmelerine karşılık gelen bölgedeki nöronların ağırlık faktörleri, daha küçük göz sekmelerine karşılık gelen bölgelerdeki nöronların ağırlık faktörlerinden daha bü-



Şekil 6.8 Beynin bir haritadan gelen sinyalleri sayaca dönüştürmesine dair bir model. *A*-*E* nöronlarının, kesik çizgilerle gösterilen alıcı alanları ve güçleri şekildeki gibi ters ok uçlarının kalınlıklarıyla temsil edilen çeşitli güçlerde sinaptik "ağırlıkları" olduğunu düşünelim. *A* nöronunun alıcı alanında uyaran varsa, nöron bu bilgiyi zayıf bir sinaps aracılığıyla çıktı nöronuna taşır. *E* nöronunun alıcı alanında uyarı varsa, ortaya çıkan tepki çıktı nöronuna daha güçlü bir sinapsla iletilir. Bunun sonucunda çıktı nöronu uyaranın lokasyonuyla orantılı bir aktivite düzeyinde ateşlenir.

yük olmalıdır, çünkü başlattıkları hareketler daha uzun bir sürede daha fazla kuvvet gerektirir. Büyük genliğe sahip bölgelerdeki nöronlar, dijital kodlardaki yüksek basamaklı sayı hanelerinin değerlerine benzer: ikinin 0, 1 veya 2. kuvvetlerinden ziyade 4, 5 veya 6. kuvvetleri gibi.

Beynin bazı nöronların aktivitelerini diğerlerinden daha fazla ölçerken veya ağırlıklı sayarken, nöronların oluşturduğu sinaps bağlantılarının sayı ve güçlerinden yararlandığı düşünülüyor. Bu durumda, "büyük sekme" bölgesinde yer alan bir nöron, "küçük sekme" bölgesinde yer alan nöronlardan daha fazla veya daha güçlü sinapslar oluşturur.

Ağırlıklandırma ve birleştirme mantıklı bir fikir ama bir sorun daha var: Superior colliculus haritasındaki nöronlar her zaman aynı sayıda eylem potansiyeli üretmezler. Daha önce de sözünü ettiğimiz gibi, görsel nöronlar farklı parlaklık seviyelerinin yarattığı uyaranlara farklı tepki verirler. Dolayısıyla, bir güneş ışını hedefteki kuşu aydınlatıyorsa, superior colliculustaki nöronlar kuşun gölgede olması durumunda üreteceklerinden daha fazla eylem potansiyeli üreterek tepki verirler. Ayrıca beyin haritadaki her nöronun ağırlıklı eylem potansiyellerini topladığında, toplam hangi nöronların ateşlediğine bağlı olarak değişir ama *aynı zamanda* bu nöronların ne güçte ateşledikleri de toplamda rol oynar. Motor komutu yalnızca hedefin yerine göre değil, aynı zamanda parlaklığa göre de değişir. Bu da, loş bir hedefe (veya küçük bir hedefe ya da nöral aktivitenin miktarını azaltacak herhangi bir faktöre) doğru yapılan sekme hareketinin, daha aydınlık ve büyük bir hedefe doğru yapılandan *daha kısa* olacağı anlamına gelir. Çok kısa bir sekme hareketi, hedefin foveayı bulmayacağı anlamına gelir. Yani sekme hareketi görevini yerine getirmemiş olur bu durumda.

Dolayısıyla, beyin bir şekilde nöronların ne şiddette tepki verdiğini kontrol etmek ve bunun çıktıyı etkilemesini *önlemek* zorundadır. Bu bir normalleştirme biçimidir, fırsat eşitliği sağlamaktır; öğretmenlerin, bir öğrenci hastalık nedeniyle okula gelemediği için birkaç ev ödevi eksik kaldığında yaptıkları şeye benzer biraz: Toplam puanlar üzerinden hesaplama yapmak yerine, öğrencinin yaptığı ev ödevlerinin puanlarının ortalamasını alırlar. Beynin bu tür ortalamaları nasıl yaptığı, günümüz sinirbiliminde henüz çözülememiş önemli bir sır. Bazı nöral devreler toplamı her bir hedefin başlattığı aktivitenin miktarını yansıtan bir faktöre bölüyor olabilir belki. Veya belki de nöral devre haritadaki aktivitenin motor komutun hesaplanmasına katılma miktarını bir şekilde sınırlıyor, böylece parlaklık veya büyüklükten kaynaklanan farklılıkları gideriyordur.[3]

Gözlerin hareketinde son bir aşama daha var. Superior colliculusun aşağı bölgelerinden birindeki harita sayaca dönüştürüldükten sonra, sayaçta yer alan aktivite miktarı gözlerin doğru noktaya hareket etmesini nasıl sağlar? Bunu bilmiyoruz ama şu şekilde gerçekleşiyor olabileceği düşüncesindeyiz: Superior colliculusun aşağısın-

daki bir grup nöron, gözlerinizi hareket ettirmek *istediğiniz* mesafeyi temsil eden bir ateşleme hızıyla faaliyete geçer. Bu nöronlar bir geribildirim döngüsü gerçekleştiren bir nöral devreye yönelirler. Alınan "gözler ne kadar uzağa hareket *etmeli*" sinyali kaslara gönderilir ve kaslardan "gözler ne kadar uzağa hareket *etti*" anlamına gelen geribildirim sinyali alınır. "Gözler ne kadar uzağa hareket *etti*" sinyali "gözler ne kadar uzağa hareket *etmeli*" sinyali ile eşitse, son sözünü ettiğimiz sinyal kapanır ve göz hareketini durdurur.

SES LOKASYONLARINI temsil etmek konusunda ise beyin birçok seçeneğe sahiptir. Görme, dokunma ve hareketler yapılarına bağlı olarak harita veya sayaç kullanmak zorundadır. Beynin görsel sistemi haritadan yararlanır, çünkü gözlerin optiği retinada bir imge oluşturur ve beynin bu düzeni korumak için yapması gereken tek şey görme yolunun kollarının birbirine karışmasını engellemektir. Dokunma ve vücut yüzeyi için de aynı şey söz konusudur. Hareketlerde ise, kasların mekaniği bir "ateşleme miktarı" koduna ihtiyaç duyar. Kısacası, dijital ve analog tercihi mevcut donanım tarafından dikte edilir.

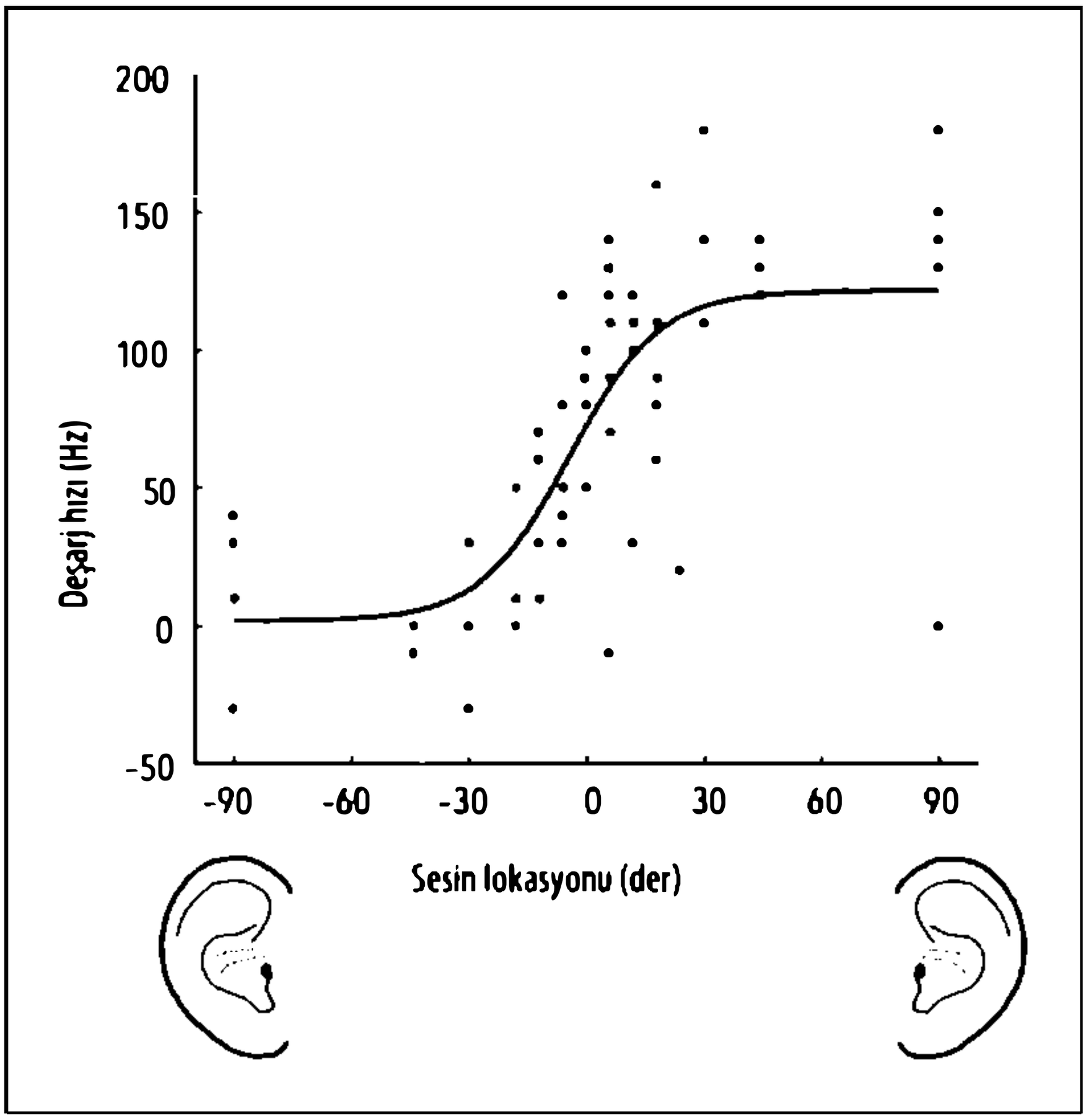
Duyma olayında ise bütün iş değişir. 5. Bölüm'de gördüğümüz üzere, beyin kulaktan sesin kaynağı konusunda, görme ve somatosensori sistemlerinin reseptörlerinden elde ettikleri gibi doğrudan bilgi elde etmez. Bu bilgiyi oluşturması gerekir. Bu nedenle bazı olasılıklar söz konusudur. Beyin bir harita mı yapar? Yoksa sesin lokasyonunu temsil etmek için duruma uygun, miktar temelli, analog bir sayaç mı oluşturur?

Bu soruları cevaplamak üzere, beynin iki kulak arasındaki zamanlama farklarını algılama mekanizmasına (sesin geldiği yerle ilgili birçok ipucu arasında belki de en iyi incelenmiş olana) dönelim. 5. Bölüm'de gördüğümüz gibi, sesin iki kulağa ulaşma süreleri arasındaki farkı algılamak için iki kulaktan girdi alan nöronların varlığına ihtiyaç vardır. Bir kulaktan gelen girdiyi diğer kulaktan gelen girdiden biraz geç göndermek, iki kulaktan gelen ve iki kulak zarında farklı zamanlarda oluşan sinyallerin bir "kıyaslama" nöronuna yaklaşık aynı zamanda ulaşmasını sağlar. Kıyaslama nöronu en güçlü tepkiyi, iki girdi "aynı hizada" olduğunda verir; yani sesin "uzak-

taki" kulağa giderkenki ek *fiziksel* yolculuk süresi, yakındaki kulağa giderken gerçekleşen ek bir *nöral* yolculuğun buna denk süresiyle telafi edildiğinde (bkz. Şekil 5.6).

Bu durumda kod dijital midir, analog mu? Harita mıdır, sayaç mı? Cevap şaşırtıcıdır, çünkü duruma bağlı olarak bunların hepsi doğrudur. 1948'de Lloyd Jeffress, çeşitli zaman kaymalarına karşılık gelen çeşitli uzunluklarda birçok "gecikme hattı"nın olduğuna dair bir teori öne sürdü.[4] Bu teoriye göre, *çakışma dedektörleri* olarak adlandırılan farklı kıyaslama nöronları en güçlü tepkiyi farklı göreli gecikmelere verir. Bu durum ise belli mekânsal alanlara karşı seçicilik meydana getirir. Bir çakışma dedektörü nöronu en güçlü tepkiyi, sol ve sağ kulak sinyallerinin arasındaki zaman farkı o nörona uygun olduğunda verir; bu durum o nöronun sol ve sağ kulaklardan başlayan kendine özgü nöral girdi yollarından kaynaklanır. İki kulaktan eşit girdi süresine sahip bir nöron en güçlü tepkiyi karşıdan gelen seslere (veya arkadan gelen seslere – karışıklık konisini hatırlayın!) verir. Sol kulağa gelen girdiyi sağ kulağa gelen girdiye göre biraz geç alan bir nöron ise en güçlü tepkiyi, ses sol kulağa sağ kulağın girdi alış süresiyle çakışacak şekilde ulaştığında verir. Bu şekilde her nöronun dış mekânda, o nöronun kendi girdi yolunun yarattığı özgül kademeli ateşlenme temelinde işleyen bir alıcı alanı vardır. Bunun sonucunda da, farklı lokasyonlara en iyi tepki veren ayrı ayrı nöronlar bulunur. Toplamda, bu şekilde ses dünyasının bir haritası oluşturulur.

Peçeli baykuş gibi bazı hayvan türlerinde buna benzer şeyler oluyor gibi görünüyor. Ama başka türlerde, örneğin primatlarda ve birçok memelide durum biraz farklıdır. Her biri işitme dünyasındaki belli lokasyonlara hassas olan bu türler, bir dizi çakışma dedektöründen ziyade iki temel nöron çeşidine –biri soldan, diğeri sağdan gelen seslere daha iyi tepki veren nöron dizilerine– sahip oldukları izlenimini veriyorlar (Şekil 6.9).[5] Bu hassasiyet, bir kulaktaki girdinin diğer kulaktaki girdiden geç ulaşması esasına dayanır ama "en iyi" gecikmeler oldukça uzundur (bu gecikmelerin süresi, sesin fiziksel olarak iki kulağa ulaşması arasında olabilecek en büyük farktan daha fazladır). Dolayısıyla hangi nöronun hangi sese daha iyi tepki verdiğinin bilgisi, sesin lokasyonu hakkında pek bir şey söyle-



Şekil 6.9 Primat inferior colliculusundaki (işitsel bir beyin alanı) bir nöronun tepkileri. Nöron, sağda doksan dereceden (kulaklar arası zamanlama ve ses yüksekliği farklılıklarının azami değere ulaştığı yerden) gelen seslere diğer lokasyonlardan gelen seslerden daha şiddetle tepki verir. Nöronların büyük bir çoğunluğu sağdan ve soldan gelen seslere benzer tercihler gösterir.

mez. Her iki nöron grubu da çoğu sese tepki verir ama tepkilerinin şiddeti sesin lokasyonuna göre değişir. Nöral tepkiler, iki kulak arasındaki zaman farkı tercih edilen kulağın lehinde arttıkça şiddetlenir. Bu da tanıdığımız bir şeyin, yani sayacın varlığına işaret eder: Nöral ateşlemenin miktarı, sesin belli bir tarafa ne kadar yakın olduğuna göre değişir. Sesin lokasyonunun yatay bileşeni için bir analog kod!

Ses yüksekliği de nöronlarda miktara bağlı bir kodun üretilmesini sağlar muhtemelen. Zaman farklılıklarının algılanmasında olduğu gibi, ses yüksekliğindeki farklılıklar da iki kulağa ulaşan sinyaller arasında belli bir kıyaslama biçimi gerektirir. Burada da kıyaslama, 4. Bölüm'de nesnelerin sınırlarının algılanması konusunda gördüğümüze benzer bir uyarma ve ketleme kombinasyonunu içeriyor olabilir. Ses yüksekliği farklılıklarının algılanmasında rol oynayan kıyaslama nöronları, bir kulaktan uyarıcı girdi alırken öteki

kulaktan ketleyici girdi alıyor olabilir. Örneğin, solu tercih eden bir nöron sol kulaktan bir uyarıcı girdi alırken sağ kulaktan ketleyici bir girdi alıyor olabilir. Ses sola kaydıkça sol kulaktan sağ kulağa göre daha yüksek duyulur. Solu tercih eden nöron, soldan gelen seslerde en yüksek derecede uyarılır ve en düşük derecede ketlenir, sağdan gelen seslerde ise en düşük derecede uyarılır ve en yüksek derecede ketlenir. Keza, sağı tercih eden nöronlar da bunun tam tersi bir örüntü sergiler. İki grup nöronda da, tercih edilen taraftan gelen sesler karşı taraftan gelen seslere göre daha fazla tepkiye neden olur. Bu nöronlardaki ateşleme miktarı, bu şekilde ses yüksekliği farklılıkları için bir analog kod vazifesi görür ve bu bilgi sesin lokasyonunun yatay özellik taşıdığını vurgulamaya yarayabilir.

Az önce haritalarla sayaçların harmanlanabildiğini gördük. Superior colliculus, bir göz hareketinin görsel hedefinin yerine işaret ederken haritadan yararlanır, ama örneğin maymunlarda aynı göz hareketini bir sesin geldiği yere yönlendirirken sayaçtan yararlanır![6] Bu durumlarda nöronlar aldıkları girdilerin özelliklerini korurlar, yani görsel bilginin haritasını çıkarırlar ama sesin lokasyonunu ölçerler. Superior colliculus ile kaslar arasındaki bağlantılar her iki sinyal tarzına uymak, göz hareketi talebinin nasıl başlatıldığından bağımsız biçimde gözlerinizi istediğiniz yere yönlendirmek zorundadır.

Bu bölümü son bir muammayla bitiriyorum. Beynin frekans temelli spektral ipuçlarını ses lokasyonu olarak nasıl kodladığı tam olarak bilinmiyor. Bir sesin spektrumundaki sönümlenme sesin dikey konumuna göre değişir, ama bu değişiklik karmaşık yollarla gerçekleşir. Bir frekans en çok ses belli bir yükseklikten geldiğinde sönümlenirken başka yüksekliklerde o kadar sönümlenmez, ama farklı frekanslar farklı örüntüler izler. Örneğin arkadaşınız size ikinci katın penceresinden seslendiğinde, sesindeki bazı frekanslar diğerlerine oranla azalır; size bir merdivenin altından seslendiğinde ise farklı frekanslar daha fazla etkilenecektir. Nöronlara ulaşan girdi örüntülerinde bu spektral ipuçlarının uygun yorumlara nasıl dönüştürüldüğü bilinmiyor. Tanıdık bir sesin anısı veya iki kulaktaki spektrumlar arasında yapılan kıyaslamalar bir şekilde bu süreçte rol oynuyor olmalı.

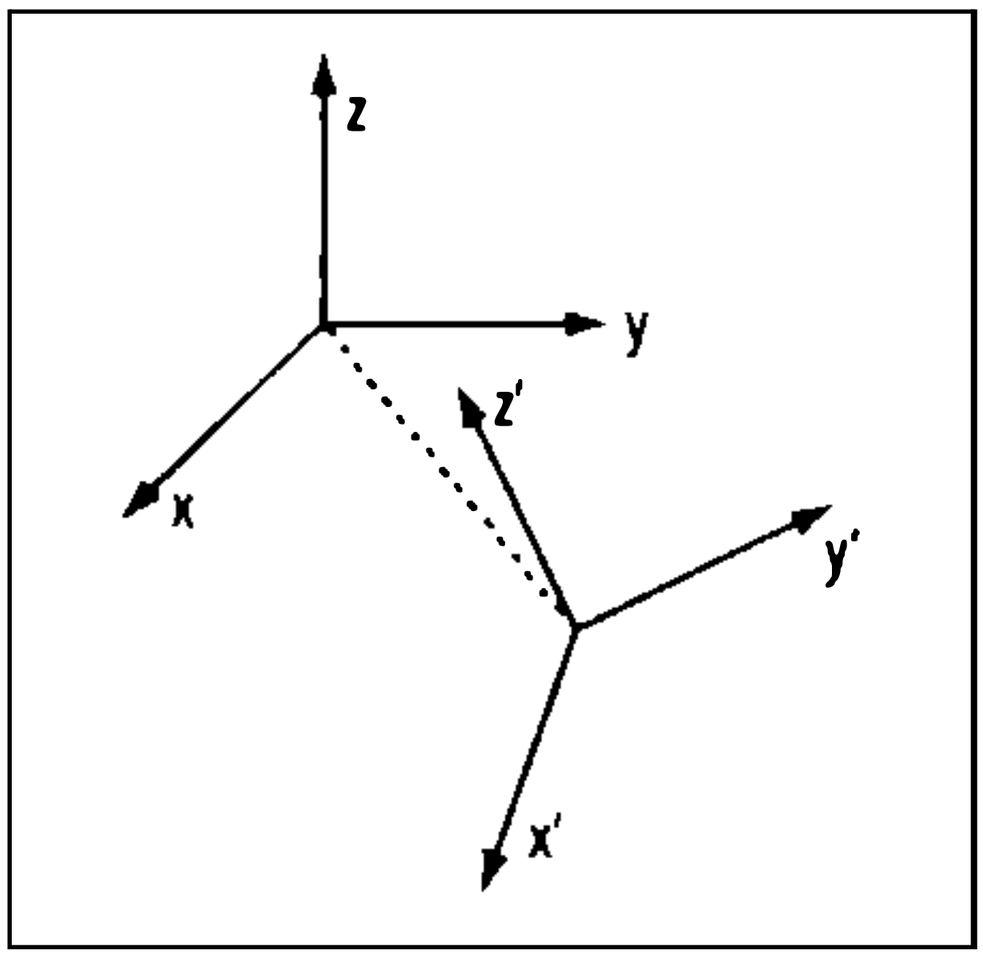
Mekân bilgisi için farklı beyin kodlarını gördüğümüze göre artık bununla ilgili bir soruya geri dönebiliriz: Mekânsal konumlar nasıl *tanımlanır*? 7. Bölüm'de göreceğimiz üzere, mekânsal konumlar farklı yollarla tanımlanabilir ve beyin farklı kaynaklardan sinyalleri sentezlerken bu çeşitli yollar arasından uygun olanları seçmek zorundadır.

7

Güneş Gözlükleriniz Samanyolunda

BEYNİNİZİN algıladığı görsel, işitsel veya bedensel mekân bilgilerinin her bir zerresinin bir nirengi noktasıyla tanımlanması şarttır. Konumları tanımlamada kullanılan bu *referans çerçeveleri* veya koordinat sistemleri (Şekil 7.1) mekân konusundaki konuşmalarımızda açıkça kendini belli eder. Örneğin güneş gözlüklerinizin kafanızda ve arabanızın garajda olduğunu veya Kanada'nın Amerika Birleşik Devletleri'nin kuzeyinde bulunduğunu söylersiniz.

Bu bölümde göreceğimiz üzere, beyin farklı bilgi türleri (görsel, işitsel veya bedensel) için farklı referans çerçevelerinden yararlanır ve eldeki göreve göre mekândaki bir lokasyonun tanımlanmış farklı konumları olabilir. Güneş gözlükleriniz aynı anda hem kafanızda, hem garajda, hem Amerika Birleşik Devletleri'nde, hatta hem de Sa-



Şekil 7.1 Referans çerçevesi, mekân içindeki bir lokasyonu tanımlayan veya onu tarif eden bir koordinat sistemidir.

manyolu Galaksisi içinde olabilir. Bir arkadaşınıza evinize ulaşmanın en iyi yolunu onun işyerine veya evine göre tarif edebilirsiniz. Hangi referans çerçevesinin akla en yatkın olduğu, o bilgiden nasıl yararlanacağınıza göre değişir. Arkadaşınız ev tarifinizi kendi başlangıç noktasından itibaren vermenizi isteyecektir.

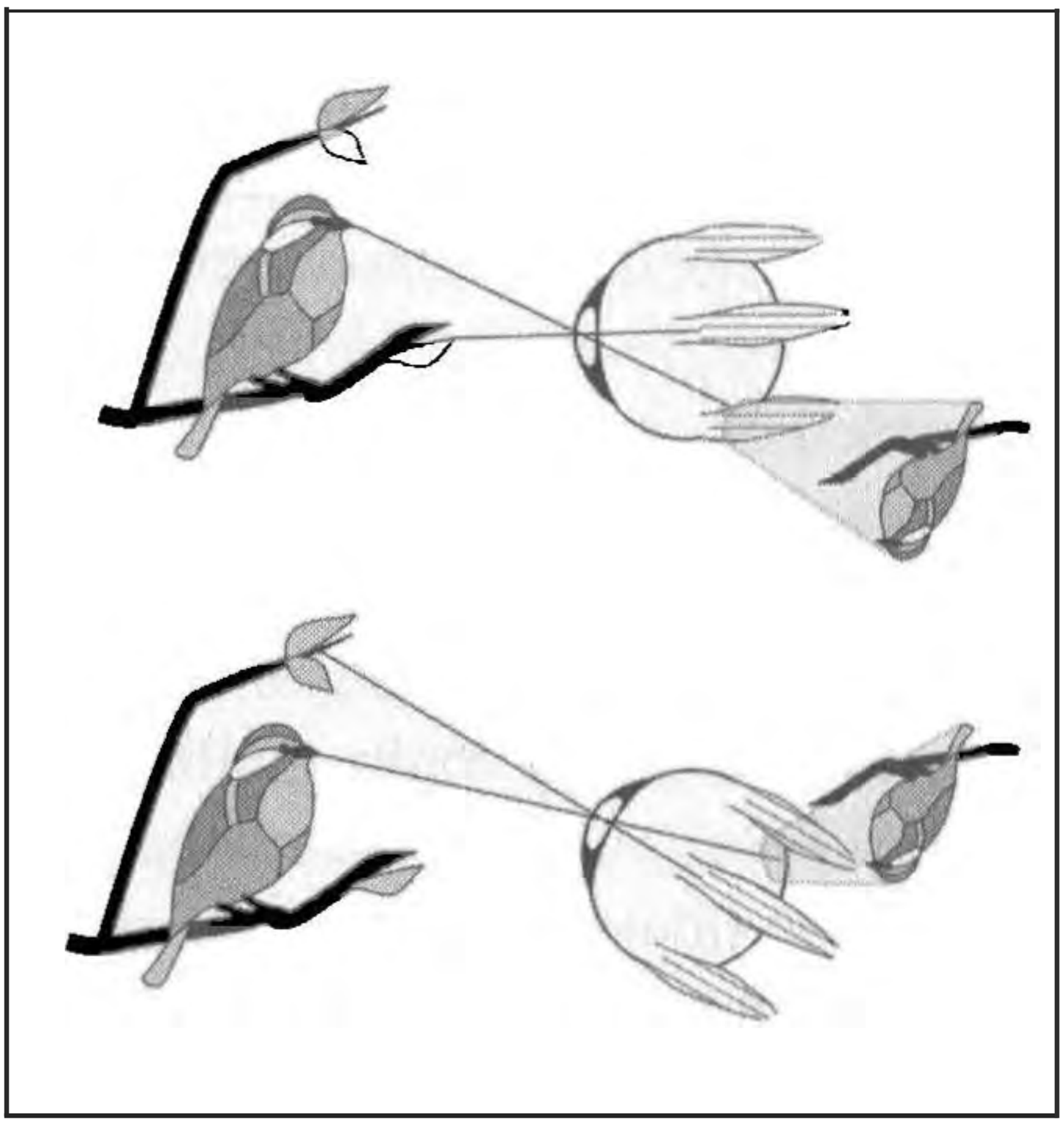
Referans çerçevelerinin eksenleri çoğunlukla hareketlidir, bu nedenle beynin bu hareketler konusunda bilgi edinmesi gerekir. Tarihteki en bildik örnek belki de, dünya mı güneşin etrafında dönüyor yoksa güneş mi dünyanın etrafında dönüyor sorusudur (s. 110, Resim 8). Güneş dünyanın etrafında dönüyor gibi görünür kesinlikle: Sabah doğuda yükseldiğini, akşam da batıda battığını görürüz. Bu nedenle, gökbilimcilerin dünyanın aslında bir günde kendi ekseni etrafında, bir yılda da güneşin etrafında bir tur döndüğüne dair ipuçlarını bir araya getirmeleri yüzyıllar sürmüştür.

Görmedeki hareketli referans çerçevesiyle başlayalım (Şekil 7.2). Üzerinde uzunca konuştuğumuz gibi, retina beyne görsel uyaranların nerede olduğunu (gözlerin doğrultusu üzerinden) söyler. Gözler bir başka yöne kaydığında, nesnenin imgesi retina yüzeyinde yol alır. Görsel mekân algımız, gözlerin konumu ve hareketiyle ilgili bilgi gerektiren bir sentezdir.

Göz hareketleri sürekli meydana gelir. Gözlerimiz kabaca saniyede üç kez (nefes alıp verişimizden daha hızlı) kısa hareketler yapar ama bunun farkına bile varmayız. Her göz hareketi saniyenin onda birinden daha kısa sürer ve bu süre içinde beyin görsel bilgiyi bastırarak bulanık görmemizi engeller. Görmedeki bu boşluk bile bilincimizden kurtulur: Karartı görmeyiz; ani bir karanlık hissi yaşamayız.

Bu göz hareketleri, fotoreseptörlerin yoğun ve sıkışık biçimde yer aldığı fovea sayesinde yararlıdır. Retinanın tamamı aynı şekilde tıka basa dolu olsaydı, gözlerinizi hareket ettirmenin pek bir katkısı olmazdı; nesneleri zaten her yerde yüksek çözünürlüklü halde görebilirdiniz. Oysa beyin küçük bir "megapiksel" bölgeyi kullanır ve retinayı sürekli yeniden yönlendirmek zorundadır.

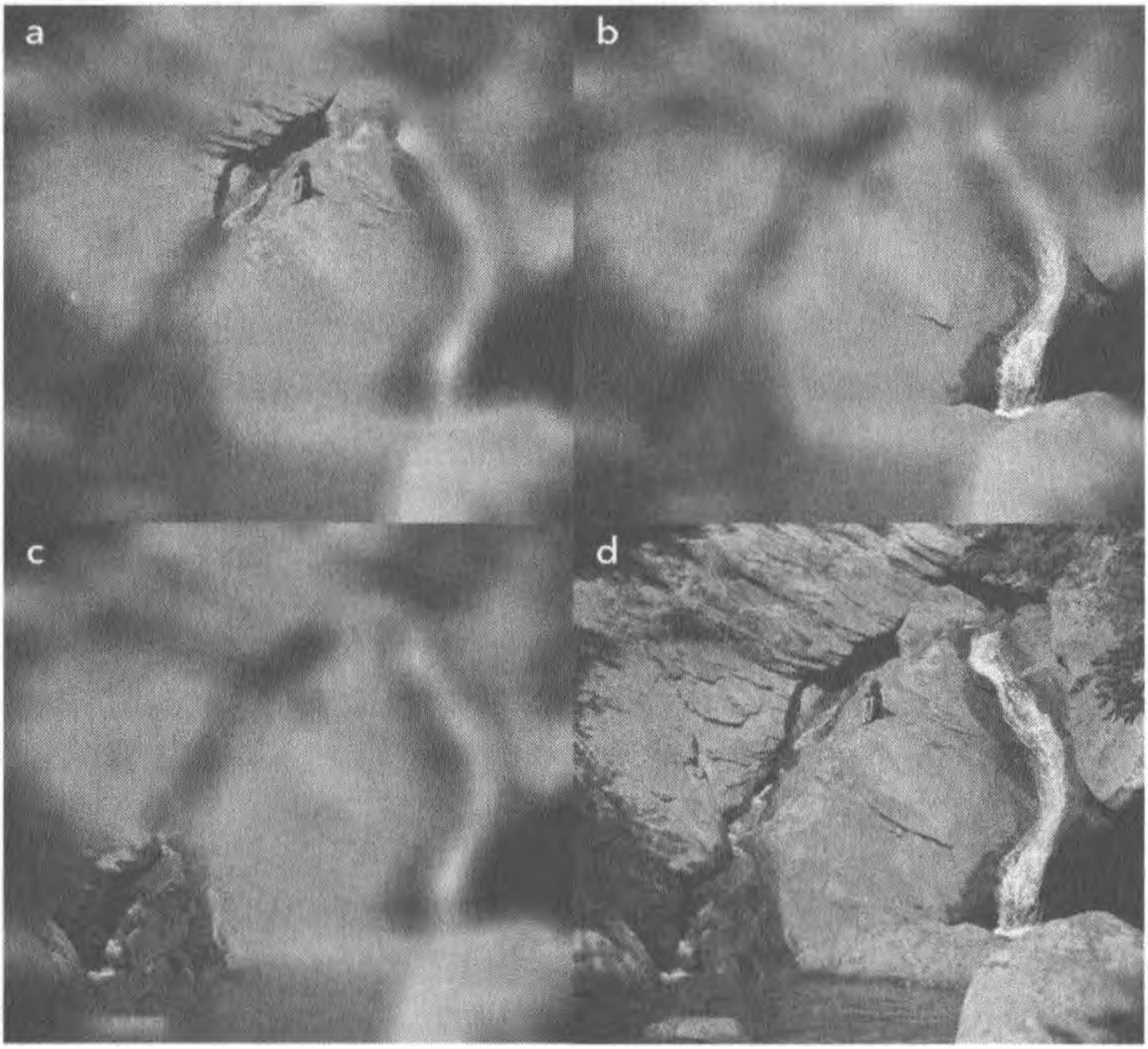
Bunu hiç fark etmemiş olmanız kuvvetle muhtemel. Fark etmeyişinizin nedeni, beynin ardışık göz hareketlerinden yararlanarak yüksek çözünürlüklü görüş noktalarını birbirine iliştirmesi ve onları



Şekil 7.2 Referans çerçeveleri, farklı bilgi türleri için farklı çerçeveler söz konusu olduğunda ve bu çerçeveler birbirlerine göre hareket ettiğinde gereklidir. Gözleriniz her hareket ettiğinde, dünyadaki nesnelerin imgeleri retinada başka bir yere hareket eder. Örneğin gözleriniz alttaki dala bakarken üstteki dala kaydığında, kuşun imgesi retinanın alt kısmından üst kısmına kayar. 5. Bölüm'de de gördüğümüz gibi, başınız her hareket ettiğinde, kuş öterken deneyimleyeceğiniz kulaklar arası zamanlama ve ses yüksekliği farklılıkları değişir. Uzanıp kuşa dokunuyor olsaydınız, kuşu vücudunuzun neresinde hissedeceğiniz dokunmak için kullandığınız ele göre değişirdi. Yani beynimiz gördüğümüz, işittiğimiz ve hissettiğimiz dünyanın zihinsel bir resmini oluşturmak için kendi hareketlerimizi hesaba katmak zorundadır.

kaynaştırmasıdır; öyle ki sahnenin tamamını net bir şekilde gördüğünüzü *düşünürsünüz*, ama aslında her defasında şekildeki gibi küçük parçalar görürsünüz (Şekil 7.3). Bu bileşik yapıyı oluşturmak, her net bölgenin nerede olduğunu bilmeyi veya bu parçaları gördüğünüz sırada gözlerin hangi yöne baktığını bilmeyi gerektirir. Göz konumu bilgisi, görsel sahnenin yalnızca keskin görünmesini değil, sabit olmasını da sağlar; göz hareketleri sırasında retina üzerinde oradan oraya kayan imgelerin dikkati dağıtmasını veya daha kötüsü, dünya içindeki fiziksel nesnelere ait gerçek hareketler olarak yorumlanmasını engeller.

Göz konumunun görsel dünya algımızdaki önemini ilk kez, 1867'de Alman doktor ve bilimadamı Hermann Ludwig Ferdinand



Şekil 7.3 Bir sahnenin yalnızca doğrudan, yani foveayla baktığımız kısmını net görürüz. Sahnenin kalan kısmı daha bulanık görünür. Buradaki kısmen bulanıklaştırılmış fotoğraflar, çeşitli göz konumlarında (*a*-*c*) bu olayın nasıl gerçekleştiğini tasvir ediyor. Ama bunu bu şekilde algılamazsınız. Beyniniz farklı göz konumlarında görülen net sahneleri birleştirip zihinde *d*'deki gibi yüksek çözünürlüklü bir görüntü oluşturur. Çok sayıdaki bu net, sabitlenmiş bölgeleri doğru şekilde bir araya getirip net bir bütün oluşturmak, gözlerin nasıl (hangi yönde ve ne kadar uzağa) hareket ettiğine dair doğru bilgi gerektirir.

von Helmholtz ortaya koymuştur.[1] Helmholtz, görsel sistem dünyanın sabit görünmesini sağlamak için göz hareketi bilgisinden yararlanıyorsa, bu göz konumu algısının değişmesinin dünyanın hareket ediyormuş gibi görünmesine neden olması gerektiğini fark etmişti. Helmholtz bu noktadan hareketle, göz konumuyla ilgili zorunlu bilginin iki yolla ortaya çıkabileceği sonucuna varmıştı. Bu bilgi ya kaslardaki reseptörlerden (3. Bölüm'de aktarılan, vücut konumu algısında kullanılanlar gibi) gelen sinyallere dayanmaktaydı ya da bi-

zatihi gözlerin hareketini izleme çabasının bir ürünüydü.

İkinci varsayım göz hareketlerine özgü bir özellik nedeniyle, yani gözlerin fiziksel zorlanmalardan muaf olmasından dolayı mümkün görünüyor. Göz hareketlerini denetleyen kasların, göz kürelerinden başka bir şeyi hareket ettirme görevi asla yoktur. Kollarda böyle bir şey söz konusu değildir. Bir kitap ya da kalem taşımak veya hiçbir şey taşımamak, elinizi belli bir pozisyonda tutmanız için gerekli kuvveti belirler. Bu ise kuvvetin vücut pozisyonuyla doğrudan eşitlenemeyeceği ve beynin, 3. Bölüm'de sözünü ettiğimiz gibi, kas iğciği reseptörleri ile Golgi tendon organlarından bu amaçla gelen geribildirimleri değerlendirmek zorunda olduğu anlamına gelir. Ama göz kaslarınız gözden başka bir şey taşımak zorunda olmadıkları için, kuvvet ile pozisyon arasındaki ilişki oldukça tutarlıdır. Dolayısıyla beynin önünde, göz kaslarından talep ettiği şeylerin izini sürmek gibi basit bir seçenek bulunur ve beyin bu kaslardan her seferinde talimatlarını itaatkârca ve harfiyen yerine getirmelerini bekleyebilir. Ama vücudunuzun diğer kısımlarının hareketlerinde beyninizin, taleplerinin sonucunda neler olduğunu anlamak için geribildirime ihtiyacı vardır. Göz hareketlerinde ise talebin kendisi yeterli olabilir.

Helmholtz bu teoriyi test etmek için, kendi gözünü dürtüp zorla hareket ettirmiş ve görsel dünya algısının bundan etkilenip etkilenmediğini kontrol etmişti. Bunu yaparken, gözü her zamanki gibi beynin "komutuyla" değil de "eliyle" hareket ettirip konumunu değiştirebilirse, gözün gerçek konumu ile beynin göz kaslarına verilen motor emirlerin geçmişine dayanarak tuttuğu göz konumu kaydı arasında bir uyumsuzluk ortaya çıkması gerektiği hipotezini esas almıştı. Helmholtz göz küresine hafifçe bastırarak gözünün bakış yönünü biraz değiştirebilmiş ve gözün hareketi nispetinde dünyanın hareket ediyormuş gibi göründüğünü gözlemleyerek teorisini doğrulamıştı. İmge hareketi normal bir göz hareketine kıyasla daha az olmasına rağmen, beyin bu hareketi göz küresinin hareketi olarak değil görsel sahnenin hareketi olarak yorumlamıştı.

Bunu kendi başınıza siz de deneyebilirsiniz: Bir gözünüzü kapatın ve açık gözünüzün dış kenarına hafifçe bastırın. Görsel sahnenin hareketi kısa ve cılız olsa da onu fark edeceksiniz. Esneme re-

septörleriniz sizin dışarıdan neden olduğunuz göz konumundaki değişikliği "anlayacaktır", çünkü bu reseptörler gözün konumunu esnemeyi ölçerek algılarlar ve bu algılama gözünüzün göz kaslarıyla hareketi sırasında da gerçekleşir, elle müdahale sonucu hareketinde de. Esneme reseptörleri görgü tanıklarıdır. Göz hareketini denetleyen merkezler ise elle müdahale sonucu gerçekleşen göz hareketini anlamazlar, çünkü bu merkezler yalnızca göz kaslarının denetlenmesinden sorumludur. Görsel dünyanın elle müdahale sonucu hareketi, beynin hareket talep etmediği için gözlerin sabit olduğuna inandığını ve esneme reseptörlerinden gelen kasılma delilini görmezden geldiğini gösterir. Beyin, emirlerinin yerine getirildiğini varsayan ve emrindekilerin eylemlerini sorgulamayan bir CEO gibi davranır.

Bu teoriye daha güçlü bir kanıt elde etmek için, belli bir motor komutun ürettiği kuvvetin miktarında beynin haberi olmadan değişiklik yapmak gerekir. 1970'lerde, Pennsylvania Üniversitesi'nden bir bilim ekibinin bunun nasıl yapılacağına dair bir fikri vardı. Fikirleri öldürücü zehir küraın kullanımını da içeriyordu.

Güney Amerika yerlilerinin avcılıkta kullandıkları kürar, motor nöronlar ile kaslar arasındaki iletişime müdahale ederek vücutta felce neden olur. Ucunda kürar bulunan ve yayla veya üflenerek atılan oklarla yaralanan hayvanlar, felç solunum kaslarına ilerlediğinde boğularak ölürler. Söylemeye bile gerek yok, kürar gönüllü olarak vücudunuza almak isteyebileceğiniz bir şey değildir. Ama Alan Rosenquist ve lisanüstü öğrencisi John Stevens'ın başında bulunduğu Pennsylvania'daki bilim ekibi tam da bunu yapmıştı.[2] Stevens ve Rosenquist, kürar göz kaslarının beynin komutlarına tepki verme yeteneğini bozduğunda, Helmholtz'un gözlemlediğine benzer bir etki görebileceklerini, gözleri hareket ettirmeye çalışıp bunu başaramamanın dünyanın hareket ediyormuş gibi algılanmasına yol açabileceğini düşünmüşlerdi.

Deneylerine düşük dozda (nefes alıp vermelerine, hatta yürümelerine engel olmayacak dozda) kürarla başlamışlardı. (Ama her ihtimale karşı, deneyi boğazlarına kanül sokup solumaya yardımcı olmaya hazır bekleyen anestezi uzmanlarının bulunduğu tam teşekküllü bir hastane odasında gerçekleştirmişlerdi.) Düşük dozlarda

kürar alınarak gerçekleştirilen bu deneylerde gözler hareket ettirilebilse de, beynin ilettiği komutlar gözlerin hareket etme mesafesiyle uyuşmuyordu. Bekleneceği üzere, göz hareketi için harcanan çaba ile alınan sonuç arasındaki ilişkinin değişmesi, gözler her hareket ettiğinde görsel sahnenin hareket ediyormuş gibi algılanmasına neden olmuştu! Stevens cesur bir girişimle (veya delice bir cesaretle) işi daha da ileri götürerek süksinilkolin adlı daha hızlı etki gösteren benzer bir ilaçla tam felç durumunda da kendini test etti. Tam felç durumu konuşmasını engelleyeceğinden Stevens el hareketleriyle iletişim imkânı elde etmek için bir koluna turnike yaparak ilacın eline akışını engellemişti. Bu deney sırasında Stevens'ın gözlerinin tam felç olması sağlanmış ve önceki deneylerde olduğu gibi, Stevens gözlerini her hareket ettirmeye çalıştığında görsel sahne konum değiştiriyormuş gibi görünmüştü.

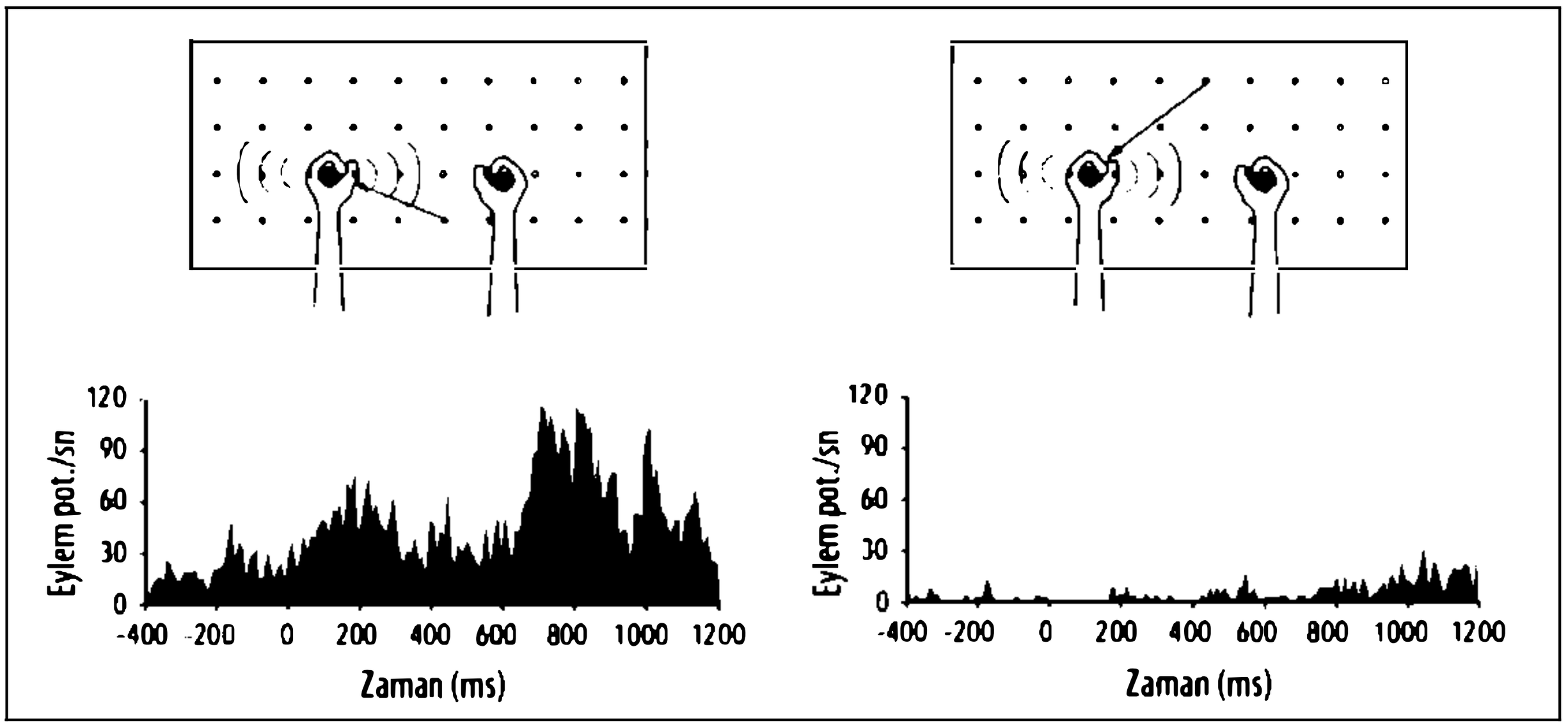
Daha sonra maymunlar üzerinde elektrik uyarılarıyla yapılan deneyler, beynin görsel uyaranların yerlerini belirlemek için kendi motor komutlarının kopyalarından yararlandığını doğruladı. Bu deneylerde, bir görsel uyaran kısa süre gösteriliyor, maymun tam o yöne bakacağı sırada söndürülüyordu (uyaran saniyenin yaklaşık beşte biri kadar sürmekteydi). Bu kısa gecikme sırasında, göz hareketi üreten bir beyin bölgesine elektrik uyarısı uygulanabilir. Maymun uyaranın ürettiği göz hareketini "biliyorsa", o zaman ona uygun bir göz hareketinde bulunarak hatasız biçimde gösterilen uyaranın bulunduğu yere bakar. Eğer yapay motor komut, beyin göz hareketleri kaydını aldıktan hemen sonra verilirse, o zaman maymun gösterilen uyaranı, yapay biçimde harekete geçirilen göz hareketinin yönü ve miktarıyla belirlenen bir konumda arar.

Uyaran superior colliculusa bu paradigmada uygulandığında, maymunlar gözlerinin hareket ettiğinin farkındaymış gibi davranıyor ve hatırlanan hedefe doğru biçimde ulaşmaya çalışıyordu. Uyaran beyin devresinin superior colliculus ile kaslar arasındaki belli bölgelerine uygulandığında ise maymunlar bazen gözlerinin konumlarının kaydığının farkında değilmiş gibi davranıyor ve hatırlanan görsel uyaranın yerini şaşırıyorlardı.[3]

DOKUNMA VE İŞİTME duyularının mekân bilgisi, bu göz merkezli dünya görüşünden epey farklıdır. 3. Bölüm'de de gördüğümüz gibi, vücut yüzeyi üzerindeki reseptörler, beyne vücut yüzeyindeki dokunsal uyaranların lokasyonuyla ilgili bilgi verir. Hareket edebilen yapılarda ve gözlerde, deri lokasyonları ile retina lokasyonları arasında çok sayıda ilişki söz konusudur. Bir tenis maçında raketi tuttuğunuz eli sivrisinek soktuğunda, sivrisineğin soktuğu yere, forehand atışı yaparken başka, backhand atışı yaparken başka açılardan bakmak durumunda kalırsınız. Bir nesnenin hem ağırlığını hem renginı değerlendirirken, beynimiz mekân içinde aynı yerden, dolayısıyla da aynı fiziksel nesneden hangi görsel ve dokunsal uyaranların geldiğini belirlemek zorundadır. Kısacası, beyin doğru deri-retina haritasını saptamak zorundadır.

Derinin vücut-yüzey haritası ile retina haritası arasında köprü kurmak, gözleriniz ile vücudunuzun uyarı alan bölgesi arasındaki bütün eklemlerin açısıyla ilgili bilgi gerektirir. Örneğin parmak ucunuzun retinadaki lokasyonu gözlerinizin, boynunuzun, omzunuzun, dirseğinizin, bileğinizin ve parmak boğumlarınızın o sıradaki konumlarına bağlıdır.

Lisansüstü öğrencisiyken danışman hocamla (David Sparks) birlikte bu köprünün kirişlerinden biri üzerine, göz konumunun dokunsal bilgi haritamıza nasıl dahil edildiğini araştıran bir deney gerçekleştirmiştik. Superior colliculustaki nöronların yalnızca görsel uyaranlara tepki vermediğini, dokunsal uyaranlara da tepki verdiğini biliyorduk. Ama bu nöronların dokunsal lokasyonları gözlere göre, yani görsel bir çerçevede takip edip etmediğini öğrenmek istiyorduk. Bunu test etmek için, maymunları elleriyle hissettikleri uyaranlara doğru göz hareketi gerçekleştirecek şekilde eğittik ve maymunların bu göz sekmelerini çeşitli başlangıç konumlarından gerçekleştirmelerini sağladık. Sonra superior colliculus nöronlarının belli bir dokunsal uyarana verdikleri tepkilerin bu ilk göz konumuna bağlı olup olmadığını test ettik. Superior colliculus nöronlarının verdiği dokunsal tepkilerin, görsel tepkilerle "uyum içinde" kalmak için göz konumunu izlediğini bulguladık (Şekil 7.4).[4] Bir dokunsal nöronun görsel alıcı alanı olsaydı, ilk göz konumu o görsel alıcı ala-



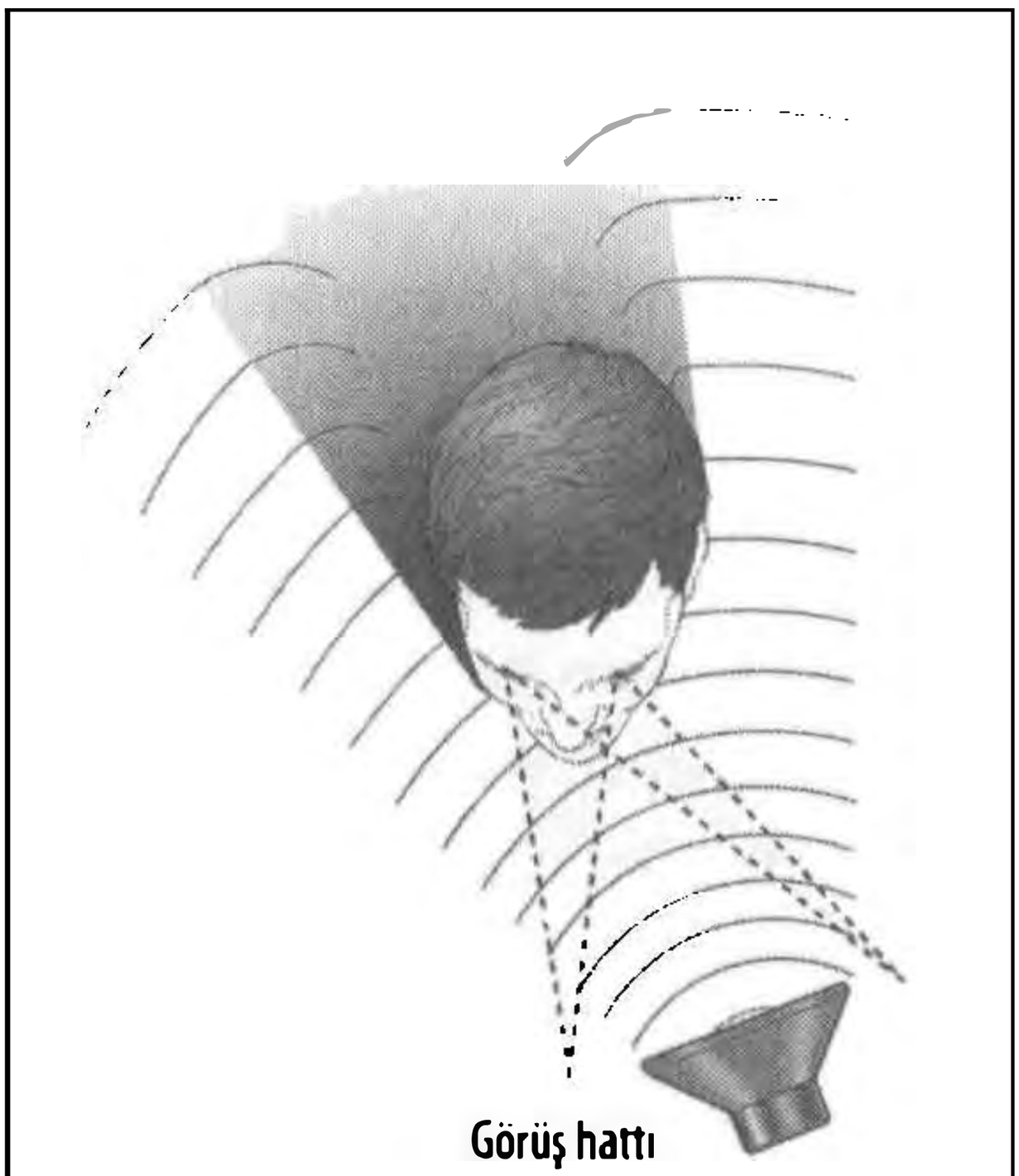
Şekil 7.4 Görme ve dokunma duyuları, en azından retinada veya deri üzerinde algılama sırasında, farklı referans çerçevelerinden yararlanır. Ama bu duyuları sıkça birlikte kullanırız, rengi ve etinin yumuşaklığını değerlendirerek bir kayısının olgun olup olmadığına bakarken yaptığımız gibi. Aynı kaynaktan (örneğin aynı kayısıdan) gelen görsel ve dokunsal sinyalleri eşleştirebilmek için beynin bu sinyalleri bir şekilde ortak bir referans çerçevesine dönüştürmesi gerekir.

Maymun superior colliculusu, görsel bir referans çerçevesine dönüştürülmüş gibi görünen bir dokunsal uyaran temsiline sahiptir. Burada, dokunmayla oluşan nöral tepkiler, dokunma gerçekleştiğinde gözlerin nerede olduğuna bağlıdır. Şekilde görülen örnekte, sol elin avucuna verilen dokunsal bir uyaran, gözler elin altına yöneldiğinde (*sol*) şiddetli bir tepki oluştururken, elin üstüne yöneldiğinde (*sağ*) o kadar şiddetli bir tepki oluşturmuyor.

nı dokunsal uyaranın lokasyonunun üzerine yerleştirdiğinde bu nöron en güçlü tepkiyi verirdi.

Görsel sistemler ile işitsel sistemler birbiriyle "konuşmaya" çalıştığında, benzer bir dil engeliyle mücadele ederler (Şekil 7.5). İşitsel sistemlerin lokasyon duyusunu edindiği ipuçlarının hepsi (zaman farklılıkları, seviye ve frekans içerikleri) sesin kulaklara göre nereden geldiğine bağlıdır. Kulaklar başa yapışık olduğu ve kulakların fiziksel mesafeleri başın büyüklüğüyle belirlendiği için, işitsel mekân bilgisi *baş merkezli* kabul edilir; ses lokasyonları başa göre tanımlanır. Kulaklarınıza göre ileri, burnunuzun işaret ettiği istikamettir.

Elbette işitme ile görme arasındaki referans çerçevesi kaynaklı "dil engeli", görme ile dokunma arasındaki ayrılık kadar katı değildir. Burada tek dikkat edilmesi gereken şey, gözlerin başa göre konumudur. Buna rağmen gözlerimiz önümüzdeki mekânın yarısına



Şekil 7.5 Sesin lokasyonu, ses kaynağının başa ve kulaklara göre konumuna bağlı faktörlerce belirlenir. Görsel lokasyon, uyaranın imgesinin retinada nereye düştüğüne göre belirlenir, imgenin retinada nereye düştüğü ise gözlerin nereye baktığına bağlıdır. Görsel dünya ile işitsel dünya arasındaki ilişki değişkendir, gözün her hareketinde değişir.

yakın bir kısmını (± 40 derece) tarayabilir ve daha önce gördüğümüz gibi, çok sık hareket edebilir. Sesi işlemden geçirirken göz konumunu önemsememek, beyni bir görüntünün ve sesin aynı konumdan, dolayısıyla da aynı kaynaktan gelip gelmediğini doğru biçimde saptayamaz hale getirir.

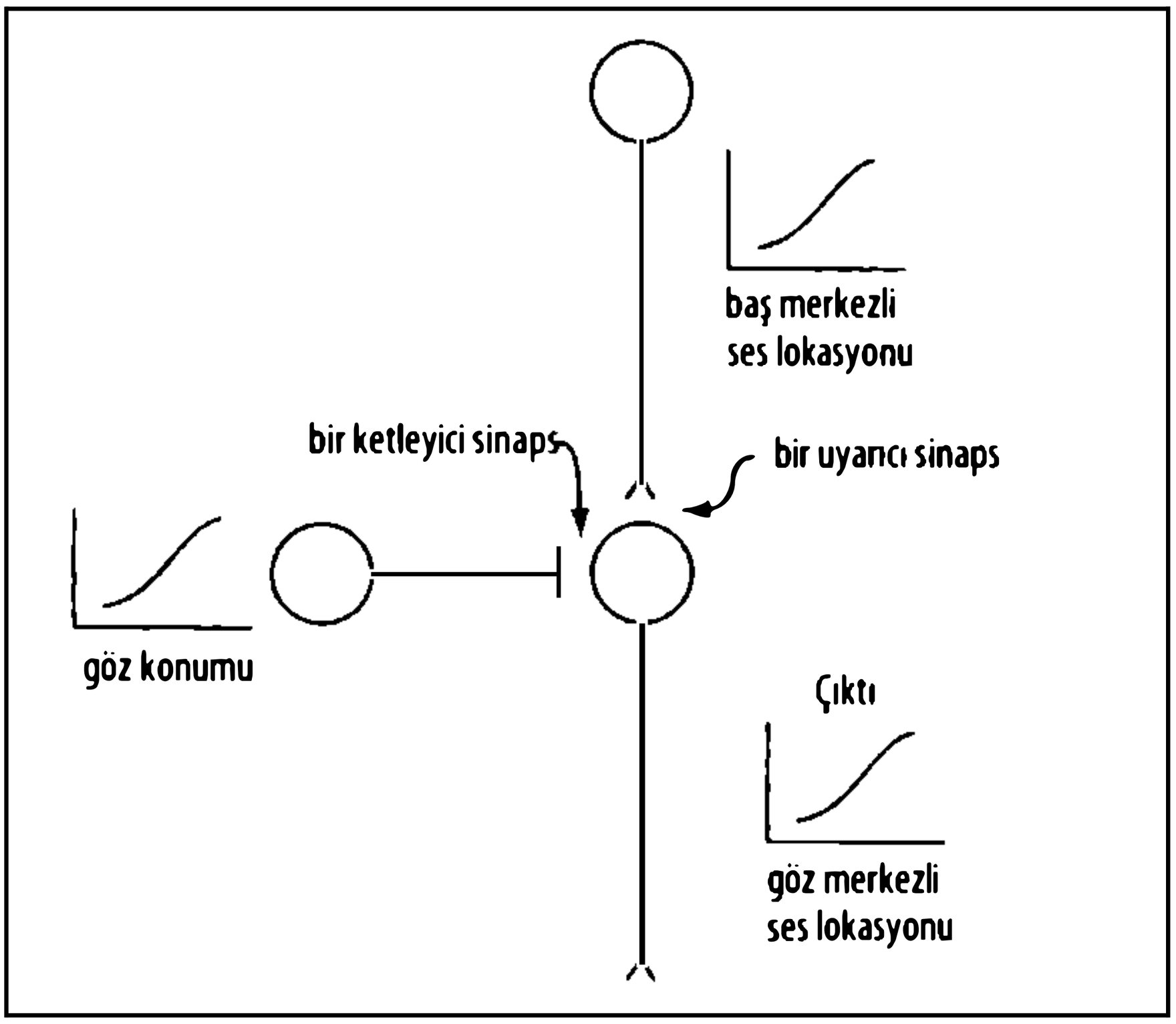
Gördüğümüz ve duyduğumuz şeyleri birleştirmek bize çok yarar sağlar, özellikle de iletişim konusunda. İnsanların yüz ifadelerini, el kol ve dudak hareketlerini görmek, konuşmalarını daha kolay anlamamızı sağlar. Biriyle yüz yüzeyken onu telefondakine kıyasla daha iyi anlamamızın bir nedeni budur.* Ses kaynaklarını görmek, biriyle kalabalık ve gürültülü bir ortamda konuşurken de bize yardımcı olur. Görme duyumuzu, takip etmek istediğimiz konuşmaya odaklanmak ve diğer seslerden uzaklaşmak için kullanırız. Görsel ve işitsel sinyaller kendi özgün, farklı referans çerçeveleri içinde kalsalardı (bunu *referans çerçevesi uyuşmazlığı* olarak adlandırabiliriz) bunların hiçbiri mümkün olmazdı.

* Diğer nedeni de, telefonların işitsel bilgilerin tamamını taşımıyor olmasıdır: Ses elektronik olarak tekrar üretildiğinde içinde frekansların hepsi bulunmaz. Gelişmiş stereo sistemleri sesi geniş bir ses frekansı aralığında iletmek konusunda gayet başarılıdır ama telefonlar bu konuda genelde çok daha kısıtlıdır.

Beynin bu soruna getirdiği çözümle ilgili ilk ipucu, otuz yıl kadar önce Martha Jay'in (o da David Sparks'ın öğrencisiydi) gerçekleştirdiği bir çalışmada elde edildi. Jay ve Sparks'ın çalışması, superior colliculusun hem görsel hem işitsel sinyalleri barındırdığı bilgisinden yola çıkıyor ve nöronların referans çerçevesi uyuşmazlığıyla nasıl başa çıktıkları sorusuna odaklanıyordu. Çalışmaları, benim de yıllar sonra gerçekleştirdiğim işitmeyle ilgili çalışmada olduğu gibi superior colliculus nöronlarının testine dayanıyordu ama Jay ses tepkileri üzerine odaklanmıştı. Jay seslere yönelik nöral tepkilerin, sesin verildiği sırada maymunların gözlerinin baktığı yere göre değiştiğini bulguladı. Aynı ses maymunun gözleri sesin sol tarafına bakarken farklı, sağ tarafına bakarken farklı sayıda eylem potansiyeli üretiyordu.[5]

Öğrencilerim Kristin Kelly Porter, David Bulkin ve doktora sonrası çalışması yapan Uri Werner-Reiss ise, gözün konumuyla ilgili bilginin işitsel sinyallere zannettiğimizden çok daha "erken" (superior colliculustan önce) katıldığını bulguladılar. Sese yönelik tepkiler, işitme yolunun çeşitli bölgelerindeki, göz konumuyla ilgili bir postüral sinyalle etkileşime girer.[6] Bu etki, primer işitme korteksi gibi beynin her türlü işitmede genel bir rol oynadığı düşünülen bölgelerinde görülür ve beynin özel olarak farklı duyu sistemlerini birbirine bağlamakla yükümlü bölgeleriyle sınırlı değildir. Işitsel tepkilerde göz konumu etkilerini daha inferior colliculusta (kulağın tüy hücrelerinin birkaç sinaps uzağında olan bu yapı, gelen işitsel bilgiler için temel merkezlerden biridir) gözlemlediğiniz bile oldu. Ama doktora sonrası çalışması yapan meslektaşım Jungah Lee'nin keşfettiği gibi, superior colliculus ancak gözleri sese çevirmeye hazırladıktan sonra gözlere göre sesin tam konumunu hesaplayabilir.[7]

Beynin işitme bölgelerinde göz konumuyla ilgili bilgilerin varlığı, beynin çapraz kontrollere ve farklı duyuların koordinasyonuna verdiği değerin bir göstergesidir. Bu sinyaller bakışla tetiklenen (ve gözler farklı konumlara doğru hareket ettiğinde yumuşayan) kulak çınlaması gibi tuhaf olayları da açıklayabilir. Bu bozukluk, hayalet uzuv sendromunda olduğu gibi, beynin nöral aktiviteyi yanlış yorumladığına, yani gözlerin konumu nedeniyle üretilen sinyalleri ses kaynaklı sinyaller sandığına işaret ediyor olabilir.



Şekil 7.6 Matematiksel olarak, baş merkezli referans çerçevesi ile göz merkezli referans çerçevesinin birbirine dönüştürülmesi, sesin (başa göre) lokasyonuyla ilgili bilgiden, (yine başa göre) göz konumuyla ilgili bilginin çıkarılmasını içerir. Bu sinyaller bir sayaç kullanılarak kodlanırsa, beyin ketleyici bir sinyal kullanarak işitsel sinyallerden göz konumunu çıkarabilir, böylece istenen koordinat dönüşümünü gerçekleştirebilir.

Bu bölgelerde gözün konumunu bildirmede kullanılan kod türü, işitsel sinyallerin baş merkezli koordinatlardan göz merkezli koordinatlara dönüşümü işlemine katılmaya son derece uygundur. Matematiksel olarak, koordinat değişimi çıkarma işlemi gibidir. Bir ses düz duran bir başın burna göre 15 derece sağında ise ve gözler yine burna göre 5 derece sağa yönlenmişse, o zaman ses gözlerin baktığı yerin 10 derece sağındadır.

Bunu beynin mevcut sinyalleriyle hesaplamak son derece basittir (Şekil 7.6).[8] Ses lokasyonunun yatay bileşeninin sayaç olarak kodlandığını, nöral aktivitenin sesin kulakları birleştiren eksenin bir tarafına yakınlığıyla orantılı olduğunu (en azından maymunlarda) hatırlayalım. Gözler eksenlerin bir tarafına doğru saptığında aktivite arttığı için göz konumu da sayaç özelliği gösterir. Ses ve göz konumlarının sinyalleri sayaç formatında olduğundan beyin, gözün konum sinyalini sesin konum sinyalinden çıkarmak için bir ketleyici

sinapstan yararlanarak sesin lokasyonunu gözlere göre hesaplıyor olabilir.

BURAYA KADAR dışımızdaki uyaranların lokasyonlarını belirleyen üç duyu sistemini (görme, işitme ve dokunma) gördük. Kendi vücudumuzun şeklini (uzuv ve eklemlerimizin konumlarını) nasıl anladığımızı da biliyoruz. Beynin mekân bilgisi konusunda çok sayıda kısıtlama ve seçeneği bulunduğunu, konumları tanımlarken farklı kod türleri ve yöntemler arasında seçim yapması gerektiğini gördük. Artık mekânı daha büyük ölçekte değerlendirmeye (içinde bulunduğumuz ortamda nasıl hareket ettiğimizi incelemeye) ve bunu gerçekleştirmek için beynin sentezlemesi gereken yeni bilgi türlerini öğrenmeye hazırız. Bu bilgilerin bazıları, duyulardan biri olduğu uzun süreden beri gözardı edilen bir kaynaktan, denge duyusundan gelir.

8

Bir Yerlere Gelmek

HİÇ ZORLUK ÇEKMEDEN mutfakta dolaşabilir, evin dışına çıkıp sokakta yürüyerek en yakın kafeye gidebilir, tekrar eve dönebilirsiniz. Bütün bunlar kolay bir şeymiş gibi görünür, oysa bunları yapmak nerede olduğunuzu ve nereye gitmek istediğinizi takip etmek için sofistike algoritmalar kullanmayı içerir.

Navigasyonun evrimsel kökleri derindir. Hareket edebilen her organizmanın gideceği yönü bulmaya ihtiyacı vardır. Basit organizmalar bile yiyeceklere ve potansiyel eşlere doğru hareket ederken, yırtıcılardan, toksinlerden ve başka tehlikelerden uzaklaşır. Şu anda kuyruklarını veya kamçılarını kullanarak bağırsaklarınızda yüzen, lezzetli şeylere doğru hareket edip hoşlanmadığı şeylerden uzaklaşan basit *E. coli* bakterisini ele alalım mesela. *E. coli* çok iyi hareket edemez. Tek yapabildiği hangi yönde ilerliyorsa o yöne doğru düz bir çizgide yüzmek veya rasgele yeni bir yöne atılmaktır. Hangi yönde yüzeceğini seçemese de, belli bir güzergâhta yüzeceği mesafeyi belirleyebilir. Yola devam ederken gıdaların çoğalıp azaldığını hissedebilir. Şeker dükkânının *E. coli* dünyasındaki muadiline doğru yol aldığını hissederse yoluna devam eder. Gıda miktarında az bir artış olduğunda veya hiç artış olmadığında, durup döner ve yeni bir istikameti dener. *Eğilimli rasgele hareket* olarak bilinen bu örüntü, bu basit bakteriyi bağırsaklarınızın yiyecek dolu bölgelerine yön-

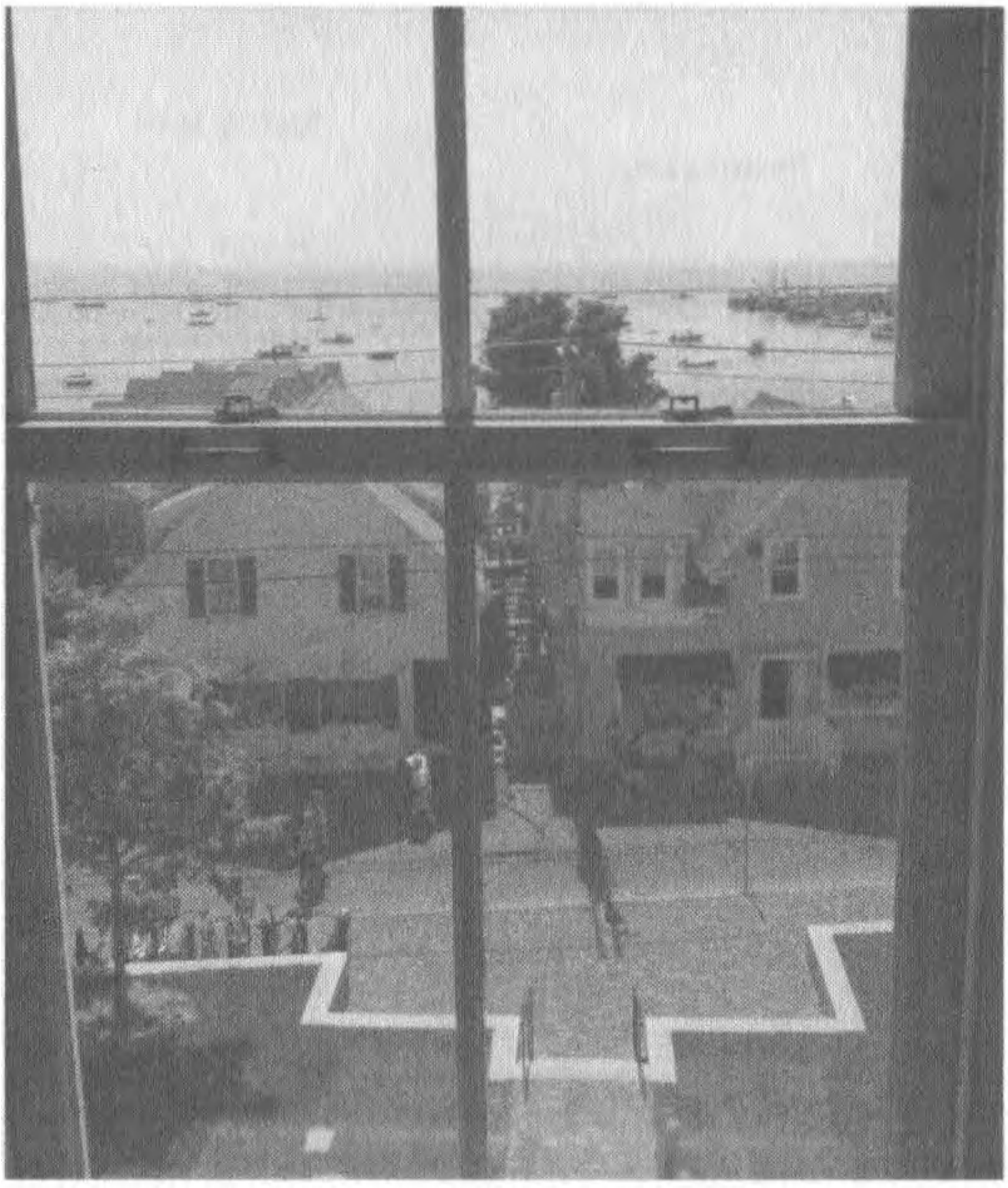
lendirmede çok etkilidir. Beyni bile olmayan basit bir canlının mekân içinde yol bulmasını sağlayan ilkel bir sistemdir bu.

Beyni olan biz insanlar ve yakın hayvan akrabalarımızın çoğu bu basit, tek hücreli organizmalardan daha amaçlı hareket eder ve gideceğimiz yönü daha karmaşık bir şekilde buluruz elbette. Her an nerede olduğumuzu genelde bilir ve bir yerden bir yere gitmek için bilinçli olarak harekete geçeriz.

Buraya kadar mekânı, duyularınızın doğrudan ve neredeyse ânında tespit ettiği ölçekte –görüntü ve ses, teninize dokunan nesneler ve vücudunuzun mevcut şekli bağlamında– inceledik. Bütün bunlar *şimdiki* duyu sahnesinin durumuyla ilgili olarak beyne aktarılır. Yönünü bulmak için beyninizin farklı duyu sistemlerinden gelen bu çeşitli iplikleri ve *E. coli* gibi, harcketlerinizden gelen iplikleri ilmikleyip örmesi gerekir. Bu çeşitli bilgileri bir havuzda bir araya getirme işlemi zaman içinde gerçekleşir ve duyusal deneyimlerinize ve yakın geçmişteki eylemlerinize dair bir belleğin varlığını gerektirir. Duyularınız birbiriyle ve beyninizin motor ve bellek sistemleriyle uyum içinde çalışarak mevcut konumunuzun farkında olmanızı sağlar ve yeni bir konuma geçmek istediğinizde bu eylemi gerçekleştirmenizde size yardımcı olur.

Örneğin şu anda Kuzey Carolina'nın Chapel Hill kentindeki Franklin Caddesi'nde bulunan bir kafede rahat bir koltukta oturuyorum. Bunu kısmen bu konumdayken algıladığım şeylerden biliyorum. Gördüğüm, duyduğum, tadını ve kokusunu aldığım şeyleri, bu kafeye önceki gelişlerimde bu yerle ilgili edindiğim anılarla eşleştirebiliyorum. Ama yalnızca anlık duyularımın bana söylediği şeylerden yararlanmak, yazar Andrew Sullivan'ın düzenlediği "Pencerenizden Görünen Manzara" yarışmasındaki fotoğrafların yerlerini bulmaya çalışmak gibi bir şeydir (Şekil 8.1).

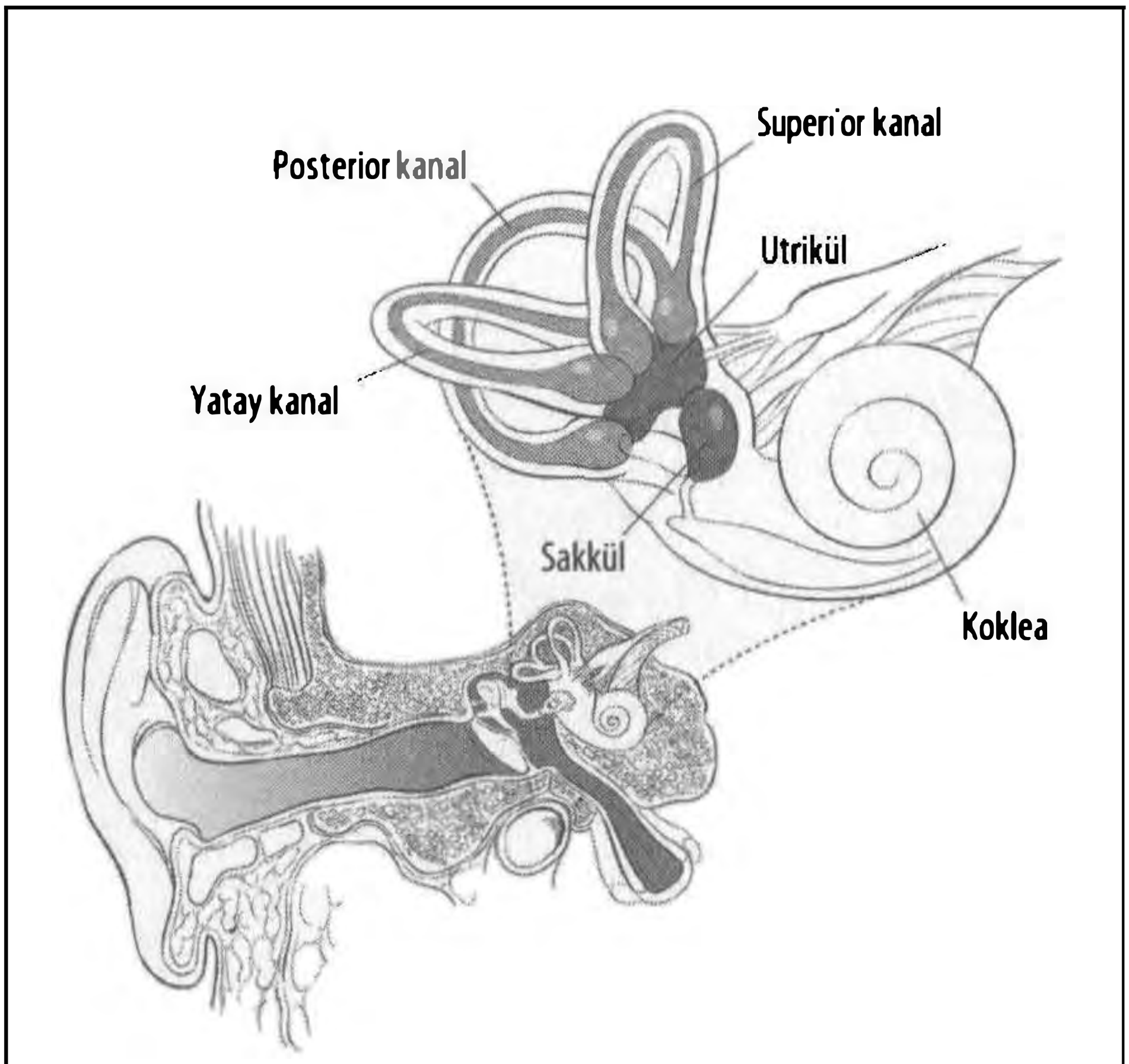
Normalde nerede olduğumuzu bilmek, belli bir noktada ne algıladığımızdan ibaret değildir, o yere nasıl gittiğimizle de alakalıdır. Beni bu bilgiden mahrum etmek için neler gerekeceğini bir düşünelim. Yolculuk sırasında etrafımı göremeyeyim diye gözlerim bağlı olmalı, ama bu da yeterli olmayabilir. Birinin beni birkaç defa döndürüp sersemletmesi gerekir, ayrıca kendi başıma yürümeme izin vermemeleri, beni taşımaları da gerekir. Bu benim yön duyumu ve



Şekil 8.1 Andrew Sullivan'ın Dish adlı blogundaki "Pencerenizden Görünen Manzara" başlıklı yarışmadan bir fotoğraf. Bu fotoğrafın nerede çekildiğini biliyor musunuz? Bilmiyorsanız, nedeni belli bir gözetleme noktasından görebildiğiniz şeyin genellikle bulunduğunuz yerle ilgili algı oluşturmaya yeterli olmamasıdır. Nerede bulunduğunuzu bilmek, oraya nasıl gittiğinizi bilmeyi içerir; bir yere nasıl gittiğinizi de hareketlerinizin kaydını tutarak öğrenirsiniz. Sorunun cevabı için bölüm sonunda, s. 182'deki dipnota bakabilirsiniz.

mesafe algımı (nerede olduğumuzu bilmemizi sağlayan iki önemli unsur) bozacaktır.

Hareket ettiğimiz yönle ilgili algımız büyük oranda vestibüler sistemden (denge duyumuzdan) gelir. Her ne kadar Aristoteles'in beş temel duyu listesinde yer almasa da, denge duyusu hayatımızın vazgeçilmez bir parçasıdır. Denge duyusu dik durmamızı ve hareket ettiğimizi (ayrıca *nereye* doğru hareket ettiğimizi) bilmemizi sağlar. Bir sandalyede, tekerlekli bir sandalyede gözleriniz kapalı halde oturuyor olsanız bile, biri sandalyeyi itip sizi dolaştırdığında vestibüler sisteminiz hareket, yön ve hız bildirebilir. Hatta asansördey-

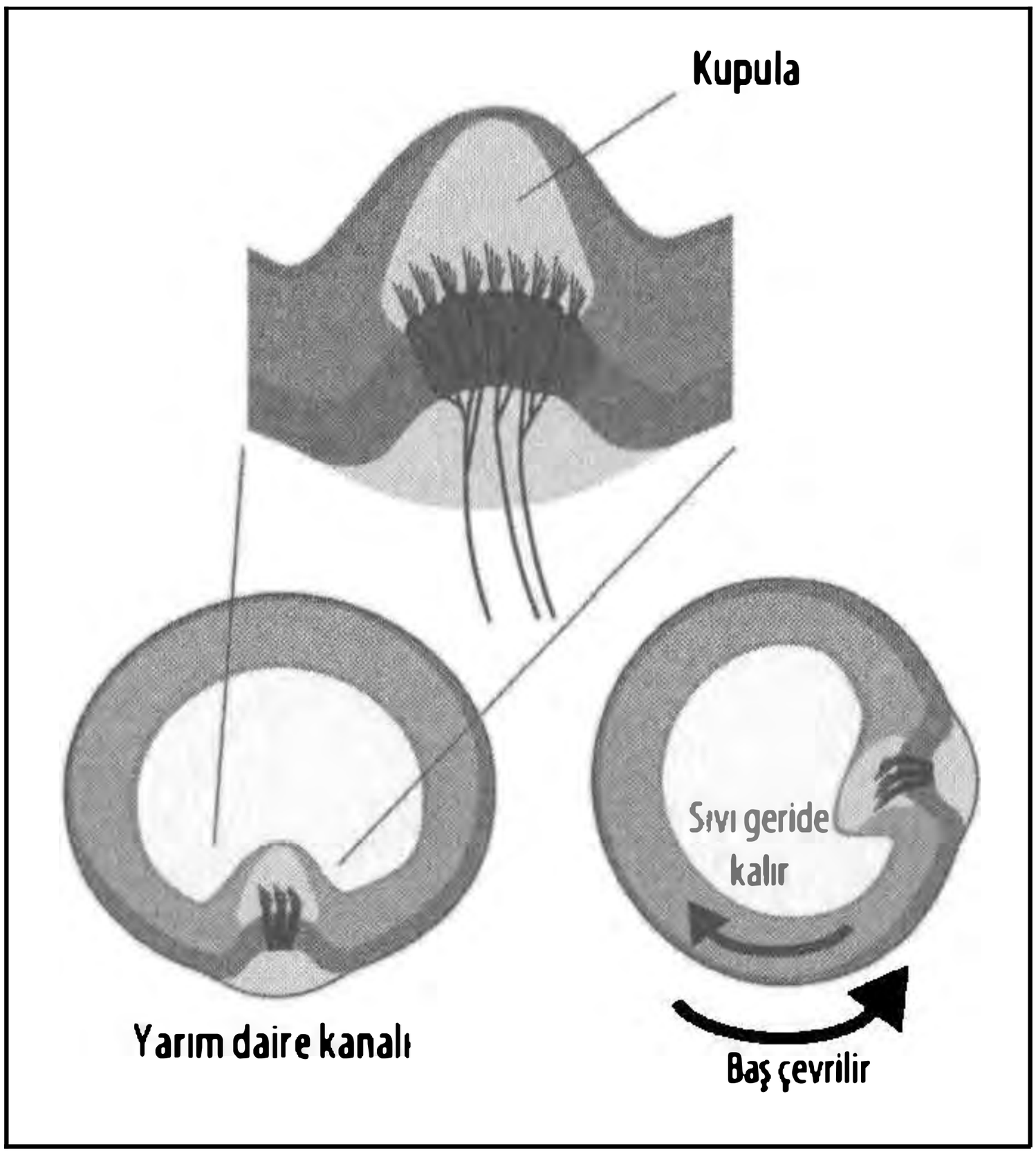


Şekil 8.2 Denge organları: üç yarım daire kanalı, utrikül ve sakkül. Bu yapılar iç kulakta, kokleanın yanında yer alır.

seniz, asansörün hareket ettiğini, genelde de yukarı mı yoksa aşağı mı gittiğini bildirebilir.

Denge, işitmenin kullandığı mekanizmaların bazılarını kullanır ve dengenin işitmeden önce evrimleştiği düşünülür. Dengenin duyu organı iç kulakta, koklea yakınlarındadır ve işitsel bilgileri taşıyan sinir aynı zamanda dengeyle ilgili bilgileri de taşır (Şekil 8.2). Denge organlarının çeşitli bölümleri vardır: *yarım daire kanalları* adı verilen içi sıvı dolu üç halka ve *utrikül* ve *sakkül* adı verilen içi sıvı dolu iki kese. Her kulakta bu yapıyı oluşturan unsurların tamamı yer alır ve her unsur farklı bir hareket türünü algılamaktan sorumludur.

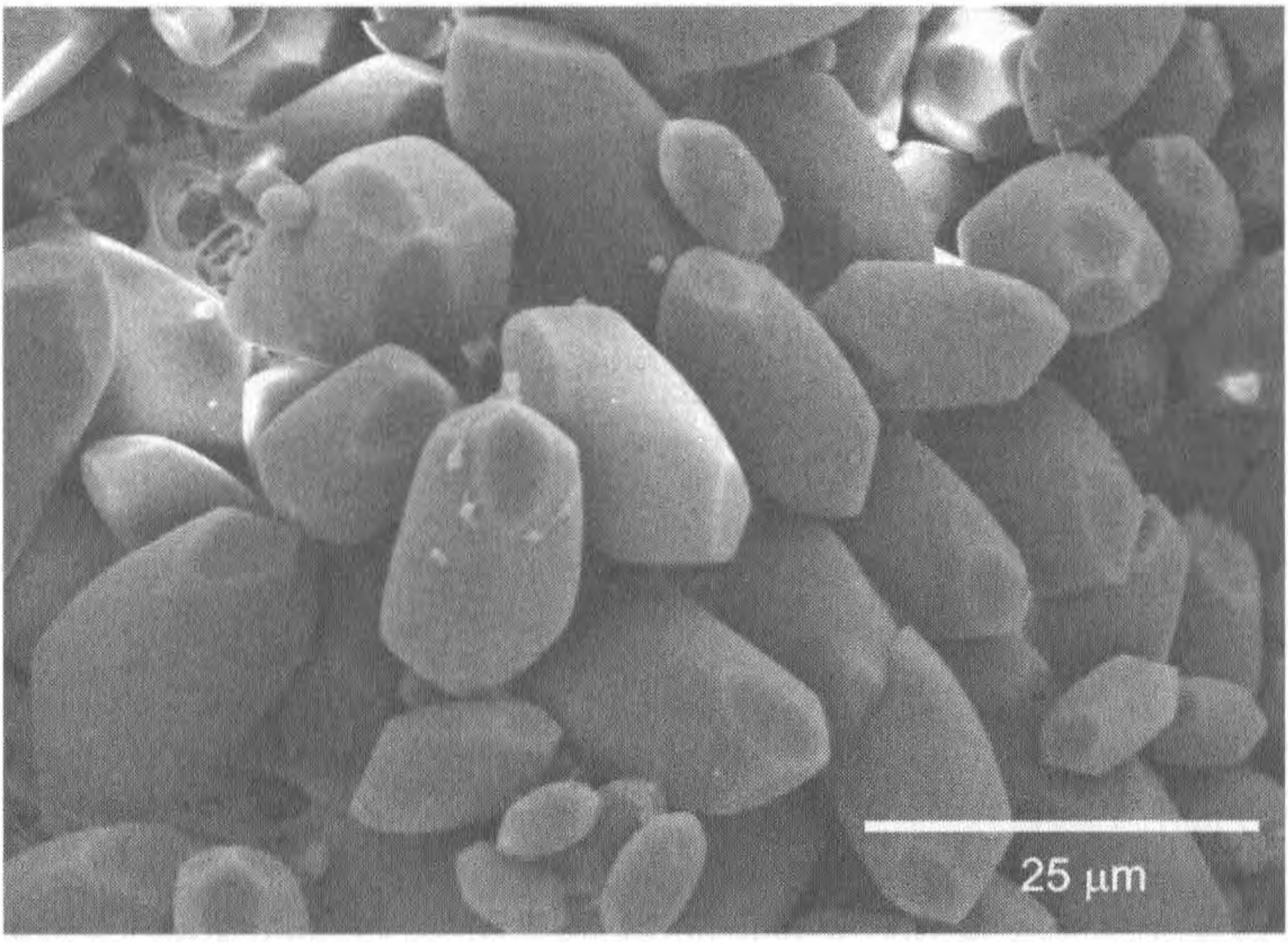
Halka şeklindeki yarım daire kanalları, başın dönüş hareketlerinden sorumludur. Bu üç kanal birbirine yaklaşık dik açı oluşturacak şekilde konumlanmıştır. İki çift dikeydir, biri çaprazlama olarak öne, diğeri geriye doğrudur. Üçüncü çift yatay düzlemdedir. Bu üç farklı yerleşim her yöne doğru yapılan hareketin algılanmasını sağlar. Örneğin başınızı bir tarafa çevirdiğinizde, kanalların kılıfı başı-



Şekil 8.3 Yarım daire kanallarında tüy hücreleri bulunur, bu hücreler kupula adlı koni biçimli jelatinsi bir yapının içine gömülüdür. Baş çevrildiğinde, sıvı ile kupula geride kalır ve tüylerin bükülmesine neden olur. Tüylerin bu hareketlerinin tüy hücrelerinin zarı içindeki iyon kanallarının açılıp kapanmasını sağladığı ve başın dönme hareketiyle ilişkili bir elektrik sinyali ürettiği düşünülmektedir.

nızla birlikte katı biçimde hareket eder (Şekil 8.3). Ama içlerindeki sıvı hareketin gerisinde kalır. İçinde buzlu çay bulunan bir bardağı çevirdiğinizde olan şeyin bir benzeridir bu: Buz küpü bulunduğu yerden pek kıpırdamaz ve bardakla birlikte dönmez. Kanal duvarlarının içlerindeki sıvıya göre hareketlerini, işitme sisteminden tanıdığımız tüy hücreleri algılar. Tüy hücrelerinin tabanları kanal kılıflarına sabitlenmiştir ve başla birlikte hareket ederler. Ama sıvı geride kaldığı için tüyler bükülür, böylece başın hareketiyle ilgili bir elektrik sinyali oluşur. Bir kanaldaki tüy hücrelerinin ne kadar bükületeceği, dönüş hareketinin yönüne ve hızına bağlıdır. İki kulaktaki ve her kanal grubundaki sinyal kombinasyonları, başın dönüşünün kesin yönünün (öne mi eğiliyor, iki yana mı sallanıyor, yoksa merakla bir tarafa mı eğiliyor) algılanmasını sağlar.

Utrikül ve sakkül ise dönüşten ziyade düz bir hattaki hareketlerinizle ilgilenir. Başka bir deyişle, bunlar dans etmek için değil yü-



Şekil 8.4 Utrikül ve sakkül içindeki küçük "taşlar"ın, yani otokoniyanın elektron mikroskobu altındaki görüntüsü.

rümek için yapılmıştır. Bu yapılar geriye doğru, yana doğru veya dikey hareketleri de (asansördeki gibi) algılayabilir, tabii dönüşlü olmamaları, düz olmaları kaydıyla.

Utrikül ve sakkülün içi de yarım daire kanalları gibi bir sıvıyla doludur ama bu sıvının içinde *otokoniya* ("kulak taşları" anlamına gelen Yunanca bir sözcük) adı verilen küçük taşlar vardır (Şekil 8.4). Otokoniya sıvının yaklaşık üç katı yoğunluğundadır, sıvının hareketiyle hareket etmeyecek kadar ağırdır. Bu taşlar, başın yönü çekim kuvvetiyle değiştiğinde veya baş düz bir hatta ivme kazandığında hareket eder. Oyuncak bir kamyonun kasasına büyük bir taş yerleştirip kamyonu hızla çektiğinizde neler olabileceğini hayal edin: Taş kasanın arkasına doğru kayar. Aynı şekilde, kamyonu havaya kaldırıp hafifçe eğdiğinizde, taş kasanın aşağıda olan kısmına kayacaktır. Kulak taşlarının hareketi de buna benzer; hareket ettiklerinde tüy hücrelerinin utrikül ve sakkülün iç kısmına bağlı olan tüylerinin bükülmesine neden olurlar. Bu tüy hücreleri inatçı saçlar gibi düzenlenmiştir, dolayısıyla grup halindeyken otokoniyadan her

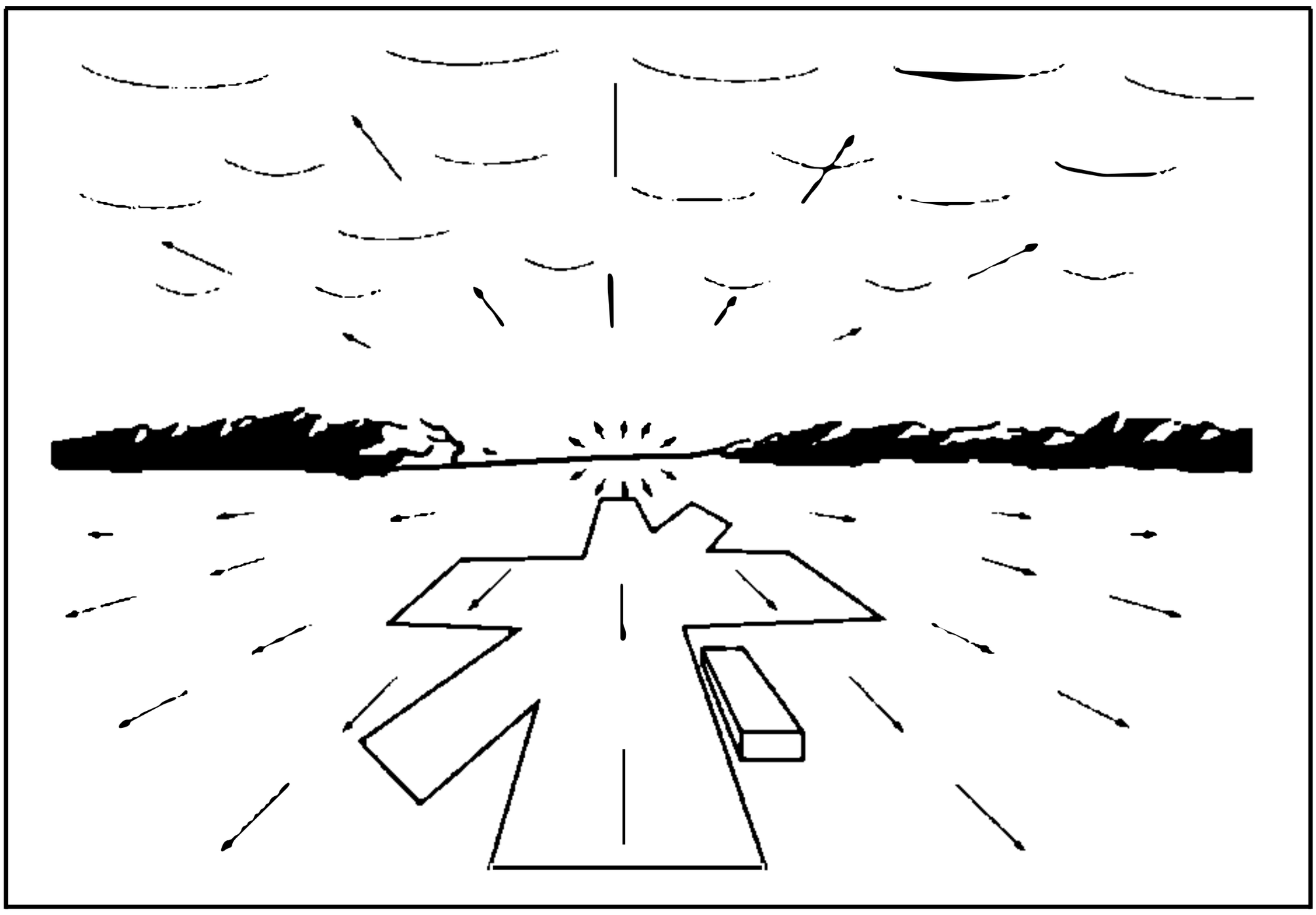
yönde gelecek baskıya tepki verebilirler.

Denge duyunuz düzgün çalıştığında onu fark etmezsiniz. Ama hatalar yaptığında, mekândaki yön duyunuz sıkıntı çeker. Örneğin kendi etrafımızda çok fazla dönmek başımızın dönmesine neden olur. Bunun nedeni, yarım daire kanalları içindeki sıvının uzun süren baş hareketinizin hızına erişmesi ve kanalla birlikte hareket etmesidir. Durduğunuzda, sıvı hareketine devam eder, bu harekete bağlı bir sinyal üretir ve beyniniz bu sinyali sizin aksi yönde döndüğünüz şeklinde yorumlar. *Gerçekten* aksi yönde dönmek sıvının hareketini daha çabuk durduracaktır ama durmakta ısrar ederseniz sorunu ters yönde yeniden yaratırsınız!

Çok fazla alkol almak da başınızı döndürebilir. Alkol, denge organlarınızdaki çeşitli maddelere nüfuz edip onların yoğunluklarında ve belli bir sürede bükülen tüy hücresi sayısında değişiklik yaparak denge duyunuzu etkiler. Sonuçta, gerçek hareket ile vestibüler tüy hücrelerinin taşıdığı bilgi arasındaki uyumsuzluk kendinizi dengesiz hissetmenize neden olur.

Bu dengesizlik hali aslında çeşitli aşamalarda gerçekleşir. Tüy hücrelerinin tüyleri kupula adlı jelatinsi bir yapıya gömülüdür. Alkol önce buraya nüfuz ederek kupulanın, endolenf adı verilen çevredeki sıvıya göre daha az yoğun veya daha hafif olmasına neden olur. Çok fazla içki içtikten sonra yatarsanız, kupula biraz yukarıya doğru yüzer ve baş dönmesi duygusu yaratır. Zamanla alkol endolenfe nüfuz eder. Endolenf ile kupulanın yoğunluğu kısa bir süre normal oranlarına geri döner ve baş dönmesi durur. Ama eve gitmek için arabaya binmeyin sakın; fırtınadan önceki sessizliktir bu. Kupula alkolden temizlenmeye başlayınca endolenften daha yoğun bir duruma gelir, sıvının dibine çöker ve tekrar baş dönmesi yaratır; bu sefer ters yönde![1]

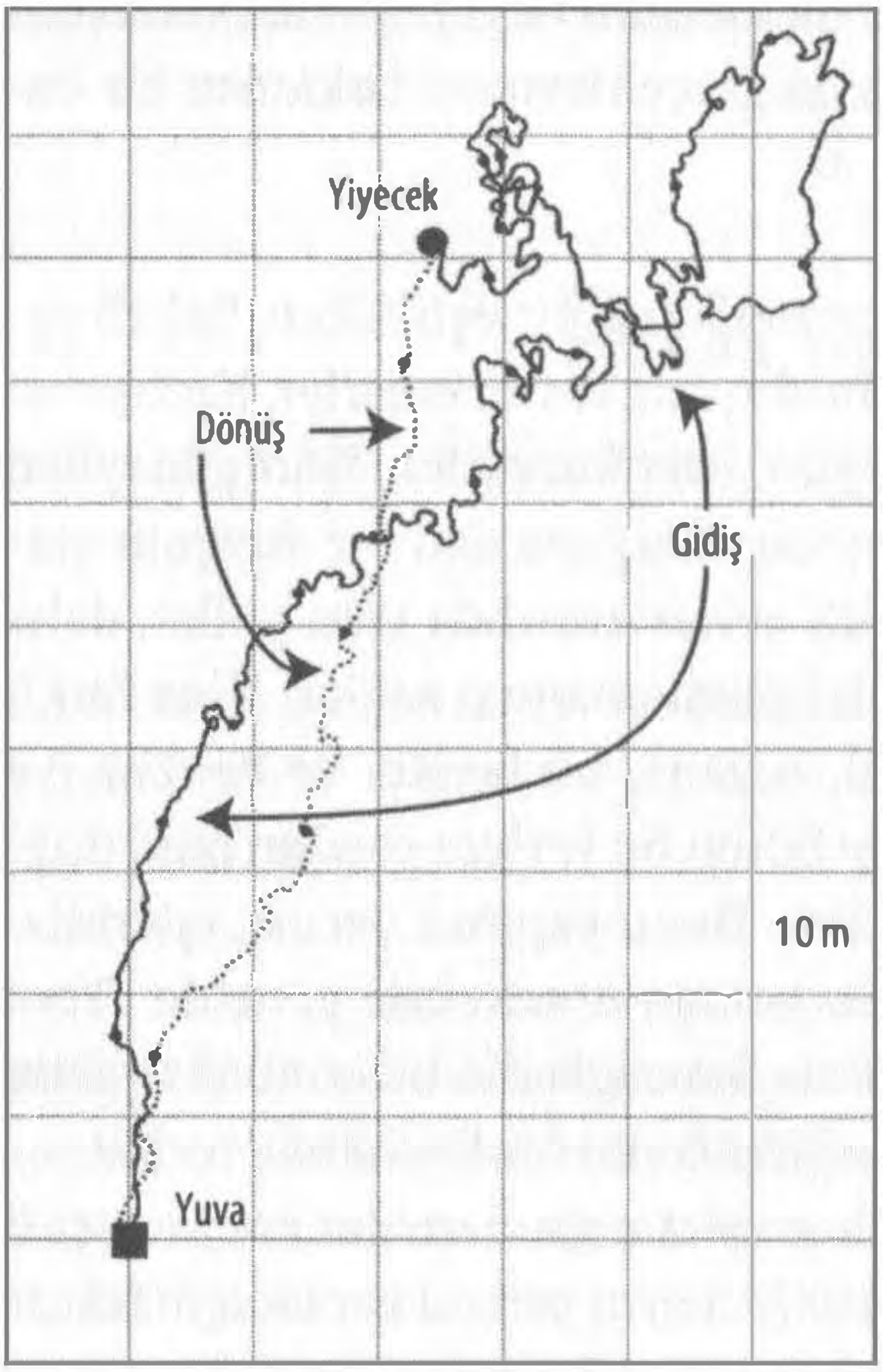
İYİ ÇALIŞIRKEN BİLE denge mükemmel değildir; yavaş veya durağan hareketleri görmezden gelir mesela. Neyse ki ortakları vardır da tek başına çalışmak zorunda kalmaz. Ortaklarından biri görme duyusudur. Görme duyusu *optik akışı*, yani görsel sahnenin bütünündeki tutarlı hareketi algılayarak denge duyusuna yardım eder (Şekil 8.5). Görsel sahnenin bu büyük çaplı hareketleri, dünyadaki nesne-



Şekil 8.5 Hareket ettiğinizde, gözlerinizin gördüğü görsel sahne sistemli bir şekilde değişir. Siz ileri doğru hareket ederken görsel sahnede lokasyonların karakteristik biçimde yer değiştirmesi *optik akış* olarak adlandırılır; optik akış, kendi hareketlerimizi algılamamıza katkıda bulunur.

lerin fiziksel hareketi sonucu çok ender gerçekleşir, bu nedenle beyin tarafından kişinin kendi yaptığı hareketler olarak yorumlanır. IMAX sinema salonlarında veya eğlence parklarında gösterilen dev perdeli filmler size hareket ediyormuş hissi vermek için bu etkiden yararlanırlar. Bu filmler seyirciye retinanın tamamına yakınını kaplayacak büyüklükte imgeler sunarlar. Perdeye yansıtılan sahne hareket ettiğinde, o hareketi kendi içinizde hissedersiniz; görüntü denge refleksinizi harekete geçirerek sağa sola eğilmenize neden olur.

Kendi yaptığımız hareketleri de gözleriz. Gözlerinizi bağlayıp sizi dolambaçlı bir yoldan götürdüğümü hayal edin. Gözlerinizi açtığımda başlangıç noktasına doğru biçimde dönüp dönemeyeceğiniz, oraya kadar yürüyerek mi yoksa tekerlekli sandalyeyle mi götürüldüğünüze bağlıdır.[2] Ortamdaki ilerleyişimizi gözlemlerken yalnızca denge ve görme duyularını kullanıyor olsaydık, yürümek ile tekerlekli sandalyeyle taşınmak arasında hiç fark olmazdı. Aktif olarak hareket ederken geldiğimiz yolu daha doğru biçimde bulabiliyor olmamız, bulunduğumuz yerin izini sürmede fiziksel eylemlerimizi gözlemenin önemine işaret eder – tıpkı 7. Bölüm'de göz hareketleri



Şekil 8.6 Bir karınca yiyecek aramak üzere yuvasından ayrılır. Lezzetli bir şey bulana kadar yol boyunca zikzaklar, daireler çizer (kalın çizgi yiyeceğe giden yolu gösteriyor). Dönüş yolunda adımlarını takip etmek yerine ganimet haberiyle birlikte doğrudan yuvasına gidebilir (kesik çizgi). Bu kestirme yoldan gitme yeteneği *konum tahmirine*, yani navigasyon sırasında mekân içindeki konum algısının yenilenmesine dayanır.

ve görme konusunda olduğu gibi.

İnsanın kendi hareketlerinin izini sürerek tuttuğu kayıttan yönünü bulmak için yararlanabileceğine dair zekice bir kanıt, Tunus çölünde yaşayan karıncalardan geldi (s. 111, Resim 9). Bu karıncalar yiyecek bulmak için çok uzaklara gider, yiyeceklerini yüklenip tekrar yuvalarına geri dönerler. Karıncalar yuvalarını bulmada çok başarılıdır ve yuvalarının yerini adımlarını sayarak buluyor gibidirler. Bunun doğruluğu karıncaların ayaklarına müdahale edilerek gerçekleştirilen yaratıcı bir deneyle kanıtlanmıştır. Bu deneyde bilimsanları, karıncaları yiyecek bulduktan sonra tam yuvalarına dönmek üzereyken yakaladılar. Karıncaların bazılarının bacaklarına domuz kılı yapıştırarak bacaklarını büyüttüler; bazılarının bacaklarını ise kırpıp küçülttüler. Deneyi gerçekleştirenler sonra karıncaları bıraktılar ve yuvalarını bulup bulamayacaklarını gözlemeye başladılar. Ayaklıklı karıncalar yuvalarını ıskalayıp daha ileriye giderken, kırpık bacaklılar yuvalarından önce durdular; karıncaların bir şekilde

adımlarını "saydıkları" ve adım ölçülerinin değiştiğinden haberdar olmadıkları varsayıldığında tam da gerçekleşmesi beklenen bir durumdu bu.[3]

Beynimiz bütün bu farklı bilgi kaynaklarını birleştirirken, belirli ayrıntıların ötesine geçen bir mekân algısına temel hazırlar. Kafeye ister yürüyerek ister arabayla gideyim, ister kuzeyden, ister güneyden gideyim, kafenin kalıcı bir konumda olduğuna dair bir duygum vardır. Bu genel konum algısı, çeşitli yerler arasında yeni yollar, daha önce kullanmadığımız kestirmeler planlamamızı sağlar. Yine farklı bir durum hayal edelim: Bakkal, eczane, hırdavatçı ve benzinciye uğradıktan sonra, eve gitmek için bütün bu yerlere sondan başa doğru dönmeniz gerektiğini düşünelim. Bunu yapmak yerine, işlerinizi bitirdikten sonra evinize en kısa yoldan dönersiniz genelde. Yeni yolların ve kestirmelerin planlanmasını sağlayan bu konum algısını doğru şekilde güncelleme yeteneğine *konum tahmini* adı verilir.[4]

Yuvalarından uzakta yiyecek arayan organizmalar (veya çeşitli yerlerde yiyecek depolayan hayvanlar) aynı yere ulaşmak için tekrar tekrar yollarını bulmak zorundadırlar ve çoğu bu konum tahmini yeteneğine sahiptir. Çöl karıncaları bile bu yeteneğe sahip görünüyor, zira yiyecek arama yolculuklarında zikzaklar çiziyor ama yuvalarına kısa ve düz bir yoldan dönüyorlar (Şekil 8.6).[5]

Bu ve önceki bölümde gördüğümüz üzere, mekân algımız çoğunlukla hatırlanan bilgiye, önceki tespitlerden, gittiğimiz yolda attığımız adımların sayısından ve yolun istikametinden elde ettiğimiz bilgilerin hatırlanmasına dayanır. 9. Bölüm'de bu ilişkiyi daha yakından inceleyeceğiz. Önümüzdeki bölümde de göreceğimiz gibi, mekân ve bellekle ilgili birçok beyin mekanizması birbiriyle çakışır; bu mekanizmalar belleğin mekân algımıza, mekân algımızın ise hatırlamamıza yardımcı olduğu iki yönlü bir yol oluşturur.*

* Şekil 8.1'deki fotoğraf, Massachussetts'in Provincetown şehrindeki Provincetown Halk Kütüphanesi'nden çekilmiştir.

9

Mekân ve Bellek

BURAYA KADAR belli duyusal girdi türleri veya hareket türleriyle ilintili mekânsal işlemlerin çeşitli veçheleri üzerinde durduk. Farklı duyu sistemlerinin, ortamdaki uyaranların mekânsal konumlarıyla ilgili bilgileri nasıl elde ettiğini gördük ve beynin eylemlerimizin bizi gitmek istediğimiz yere götürecek şekilde olmasını sağlamak amacıyla kaslarımızı nasıl kontrol ettiğini tartıştık. Son olarak, bu sistemlerin hiçbirinin tek başına çalışmadığını, çeşitli zaman aralıkları içinde birbirleriyle etkileşime girdiğini (*belleği* de içeren bir sentez gerçekleştiğini) öğrendik. Bu bölümde, bellek ile mekânsal yeteneklerimizin birbirini desteklediğini göreceğiz. Bellek mekân algısının oluşturulma sürecinin ayrılmaz bir parçasıyken, mekân da anıların depolanıp erişildiği bir çeşit arşiv görevi görür. Beynin bellek-mekân bağlantısı ise paylaşımlı bir nöral altyapıya dayanır.

Belleğimizin en çok farkında olduğumuz zaman, bir teste çalışmak veya (alışveriş listesi olmadan) market alışverişi yapmak gibi belleğimizle bir şey yapmaya çalıştığımız zamandır. Ne var ki bellek, varoluşumuz açısından diğer bütün bilişsel veya algısal beceriler kadar temel bir öneme sahiptir. Bellek olağan ve otomatik eylemlere nüfuz etmiştir: okuldan dönerken evinizin yolunu bulmak, piyano çalmak, annenizi gördüğünüzde tanımak gibi.

Bellek sistemlerimize depolanmış bilginin büyük bir kısmı doğası gereği mekânsaldır. Bir şeyleri nereye bakmamız gerektiğini

hatırlayarak buluruz. En sevdiğiniz kelime işlemci programının sürümünü yükselttikten sonra yeni versiyonda tuşların ve menülerin farklı yerlere yerleştirilmiş olduğunu fark ettiğinizde ne olduğunu düşünün. Muhtemelen tuşların ve menülerin yerlerini öğrenmeniz zaman alıyor, canınız sıkılıyordur – özellikle de yardım menüsünün yeri değişmişse! Bir de arabanızın kontrol sistemlerinin periyodik olarak "sürüm yükseltme"ye maruz kaldığını, yıllık bakım sırasında tamirciniz tarafından yerlerinin değiştirildiğini, bu nedenle de her yıl yeni bir vites değiştirme şekli öğrenmeniz gerektiğini düşünün! (Yazılım şirketleri, buraya dikkat lütfen.)

Beynin birçok duyu ve motor bölgesi de bellekle ilişkili bir faaliyet sergiler; bu bölgeler kısa süreliğine duyu veya motor olaylarıyla ilgili bilgileri depolarlar. Bu beceri, yaz akşamları ateşböceklerinin kısa süreli ışık çakmalarında görülene benzer bir görsel paradigma kullanılarak ortaya çıkarılmıştır. Bir ışık kısa süreyle yakılıp söndürülür, bunu hiçbir uyaranın olmadığı bir evre izler. Ardından denekler (hayvanlar veya insanlar) gözlerini ışığın yanıp söndüğü noktaya yöneltirler. Işığın çok kısa bir süreliğine hatırlanması yeterlidir, ama anısı olaydan sonra gözler ışığın yanıp söndüğü noktaya yönelecek zamanı bulana kadar (bir saniyenin küçük bir kesri) sürmelidir.

Beynin tepesinde yer alan pariyetal korteksteki veya artık tanış olduğumuz superior colliculustaki nöronların aktivitesini ölçtüğünüzde, nöronların bu türden bir hatırlama sürecine katıldığına dair belirtiler bulursunuz. Bu nöronlar önce sıradan görsel nöronlar gibi davranırlar, görsel uyaranlara retina içindeymiş gibi tepki verirler. Bellek bundan sonraki kısımda ortaya çıkar, görsel uyaran yok olduktan sonra. Nöronlar görsel uyaran varmış gibi *tepki vermeye devam ederler*. Denek gözlerini hareket ettirene kadar eylem potansiyellerini ateşlemeyi sürdürürler. Yani bu nöronların faaliyeti, beynin görsel uyaranın yeriyle ilgili bilgiyi göz hareketi gerçekleştirilene kadar depolamasına yardımcı oluyor gibidir. Bu sürdürülen faaliyet, çok kısa süreli ama önemli bir bellek biçiminin nöral mekanizmasını oluşturuyormuş gibi görünüyor.

Türleri ve zaman ölçekleri farklı olan bilgilerde farklı nöral mekanizmalar söz konusudur. Kısa süreli bir görsel uyaranın yerini ha-

tırlamak, bir müzik aletini çalmayı (fiziksel bir beceri) öğrenmekten, okuldaki ilk gününüzü (kişisel bir deneyim) hatırlamaktan veya Peru'nun başkentini (bir olgu) öğrenmekten farklıdır. Bu çeşitli bellek türlerinde beyin muhtelif depolama yöntemleri kullanır.

Örneğin piyano çalmayı öğrenmek gibi fiziksel beceriler edinmek, *yöntemsel* öğrenme adıyla bilinir. Yöntemsel öğrenmeyle ilişkili nöral değişiklikleri araştıran sinirbilimciler, genel olarak bu değişimlerin ayrı bölgelerde değil, bu davranışı icra eden nöral yolların *içinde* gerçekleştiğini bulgulamışlardır. Biliminsanları çoğunlukla buradaki gibi genel ilkeleri, laboratuvar ortamında ayrıntılı olarak incelenebilecek basit bir sistemi ele alarak araştırırlar. Bu tür beceri öğrenimlerinde en çok başvurulan model sistem *vestibüler oküler refleks*'tir.

Vestibüler oküler refleks, başın hareket etmesine rağmen gözlerin belli bir noktaya sabit biçimde bakabilme yeteneğine verilen havalı bir isim. Göz kaslarınız gözlerinizi, baş hareketinizin oranında ve ona zıt yönlerde hareket ettirerek baş hareketinizi dengeler. Bu durum, başınız hareket ederken görsel sahnedeki imgenin retina üzerinde gayet sabit olmasını sağlar. Bu terimde geçen *vestibüler* sözcüğü denge duyunuzun rolünü, daha doğrusu iç kulağınızın içindeki vestibüler organların oluşturduğu, başın yön ve hareketiyle ilgili duyunun rolünü yansıtır. Terimdeki *oküler* sözcüğü, işin içinde gözlerin olduğuna işaret eder. *Refleks* ise gözlerin bu şekilde hareketinin hızlı ve otomatik gerçekleştiğini ifade eder. Bu hareketi siz *yapamazsınız*. (Başınızı çevirirken birinin sizi izlemesini veya filme almasını isteyin. Kendinizi yapmamaya ne kadar zorlasanız da gözleriniz başınızın hareketine karşı koyacaktır.)

Beyniniz, gözlerinizi baş hareketinizin zıt yönünde ne kadar uzağa hareket ettireceğini öğrenmek zorundadır. Beyin bu refleksi görüş mesafesini de dikkate alarak ayarlamalıdır, çünkü gözlerle baş farklı eksenlerde hareket eder. Ayrıca, önceden öğrenilen *kazanım* (göz hareketinin baş hareketine oranı) görsel sahneyi sabit tutmayı başaramadığında (gözlüklerinizi değiştirdiğinizde yaşadığınız bir durumdur bu!) beyin kendini yeniden ayarlar. Gözlük görsel sahnenin büyüklüğünü değiştirir, hipermetroplarda sahneyi büyütür, miyoplarda ise küçültür; esasen ışığı kırma yeteneğini artırarak veya



Şekil 9.1 Miyopluğu düzeltmek için kullanılan gözlükler görsel imgeyi küçültür: Gazetenin mercekten taşan dış hatları ile mercekten görünen imgesinin büyüklüğünü kıyaslayın. Hipermetropluğu düzeltmek için kullanılan gözlükler ise bunun tam tersi bir etki yaratır. Gözlük gözünüzdeyken başınızı çevirdiğinizde, gözleriniz reçetenizde yazan numarayla orantılı miktarda ters yönde döner. Göz numaranız değiştiğinde yeni gözlüklerinize alışmak biraz zaman alır.

azaltarak gözün daha iyi odaklanmasını sağlar (Şekil 9.1). Bu yeniden ölçeklendirme, gözlüğün işlevinin temel bir parçasıdır: Gözler bir imgeyi retinaya odaklamada yetersiz kaldığında gözlük ışığın kırılmasını azaltır veya çoğaltır. Vistibüler oküler refleksin kazanımı bunu uyum sağlayacak şekilde ayarlanmalıdır; birkaç saat alan bir işlemdir bu. Denekler Stratton'ınkine benzer ters prizmalı mercekler kullandığında vestibüler oküler refleksin zıt yönde gerçekleştiği bile olur, ama böyle dramatik bir değişikliğe bir ay kadar bir zamanda uyum sağlanır.[1]

Bu tür yeniden ayarlamalar hem insanlarda hem de hayvanlarda görülür. Hayvanlar üzerinde yapılan deneylerde, bu mekânsal davranışa uyum sağlamak için gerekli öğrenmenin ve belleğin en azından kısmen, davranışları denetleyen nöral yol içinde meydana geldiği kanıtlanmıştır. Refleksin kazanımı yukarı veya aşağı yönde seyrederse, yani gözler normalde yaptıklarından daha *fazla* veya daha *az* karşı harekette bulunursa (büyüteçlerle veya "küçülteçler"le oluşturulan bir durum), göz hareketlerinin büyüklüğünü ve hızını kontrol eden nöronların oluşturduğu sinapslar değişir. Uygun kazanımla

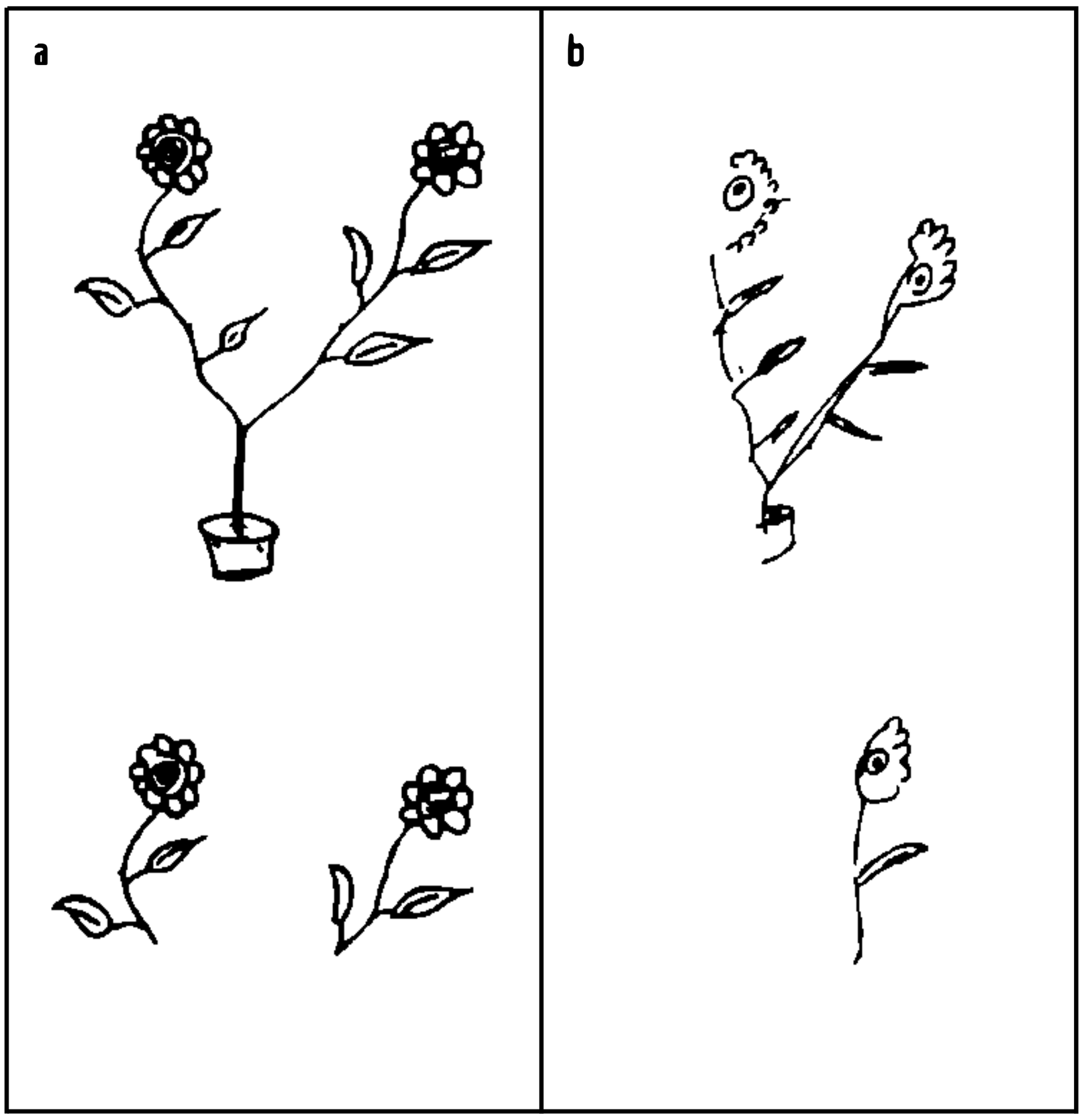
ilgili bilginin saklandığı ayrı bir yer yok gibi görünüyor: Bu bilgi hareketin icra edildiği sistemin içinde depolanır.[2]

VESTİBÜLER OKÜLER REFLEKS, mekânla ilgili, bilincinde olmadığınız bir çeşit bellek içerir. Ama bilinçli bellek de mekânsal olabilir. Örneğin pariyetal kortekste meydana gelen lezyonlar, nesneleri bulundukları (veya daha önce bulundukları) yerlerden dolayı fark edememenize veya tanıyamamanıza neden olabilir. Daha önce de sözü edildiği gibi, pariyetal korteks beynin uyaranlar yok olduktan sonra da nöronların tepki vermeyi sürdürdüğü alanlarından biridir. Ama bir inme veya hasar bu nöronların ölümüne neden olursa, görme olayının kendisinden ziyade dikkat ve bellek bozulur. Pariyetal korteksi hasarlı kişiler *görebilirler* ama gördüklerini *fark etmezler*. Bu bozukluk ayrıca, hasar görmüş bölgedeki nöronların normalde kontrol ettiği mekânsal bölgeye özgüdür.

Hasarın, mekânın sağ tarafından gelen bilgileri işleyen sağ pariyetal kortekste meydana geldiğini düşünelim. Böyle bir hasarı olan bir hastaya sol görsel alanında kaç parmağınızı gösterdiğinizi sorduğunuzda, muhtemelen size doğru cevap verecektir. Ama aynı anda hem sol hem sağ görsel alanında parmaklarınızı gösterdiğinizde, yalnızca sağ taraftaki parmak sayısını söyleyebilecektir. Hastanın sağ tarafındaki uyaranlar sol tarafındakilere üstün gelir. Bu yetersizlik türüne *göz ihmali* adı verilir. Yalnızca bir taraf hasarlıysa, bu yetersizlik *yarı göz ihmali* olarak adlandırılır. Bu sendrom genelde sağ pariyetal korteks lezyonlarında görülür.

Bu yetersizlik başka şekillerde de kendini gösterir. Örneğin, hastalar çiçek gibi tanıdık nesneleri bakarak veya zihinlerinden çizdiklerinde, resmin mekânsal yerleşiminin bozuk olduğu, yalnızca hasar görmemiş nöronların kontrolündeki mekânsal bölgelerde bulunan önemli kısımların (yaprak veya dalların) çizildiği, diğer kısımların çizilmediği görülür (Şekil 9.2).[3] Bazen bütün ayrıntılar yer alır ama bunlar "iyi" tarafa sıkıştırılır. Bu da, hastaların beyninin bütün bu ayrıntılara eriştiğine ama hastaların bu ayrıntıları bir şekilde mekânsal konumlarla ilişkilendiremediklerine işaret eder.

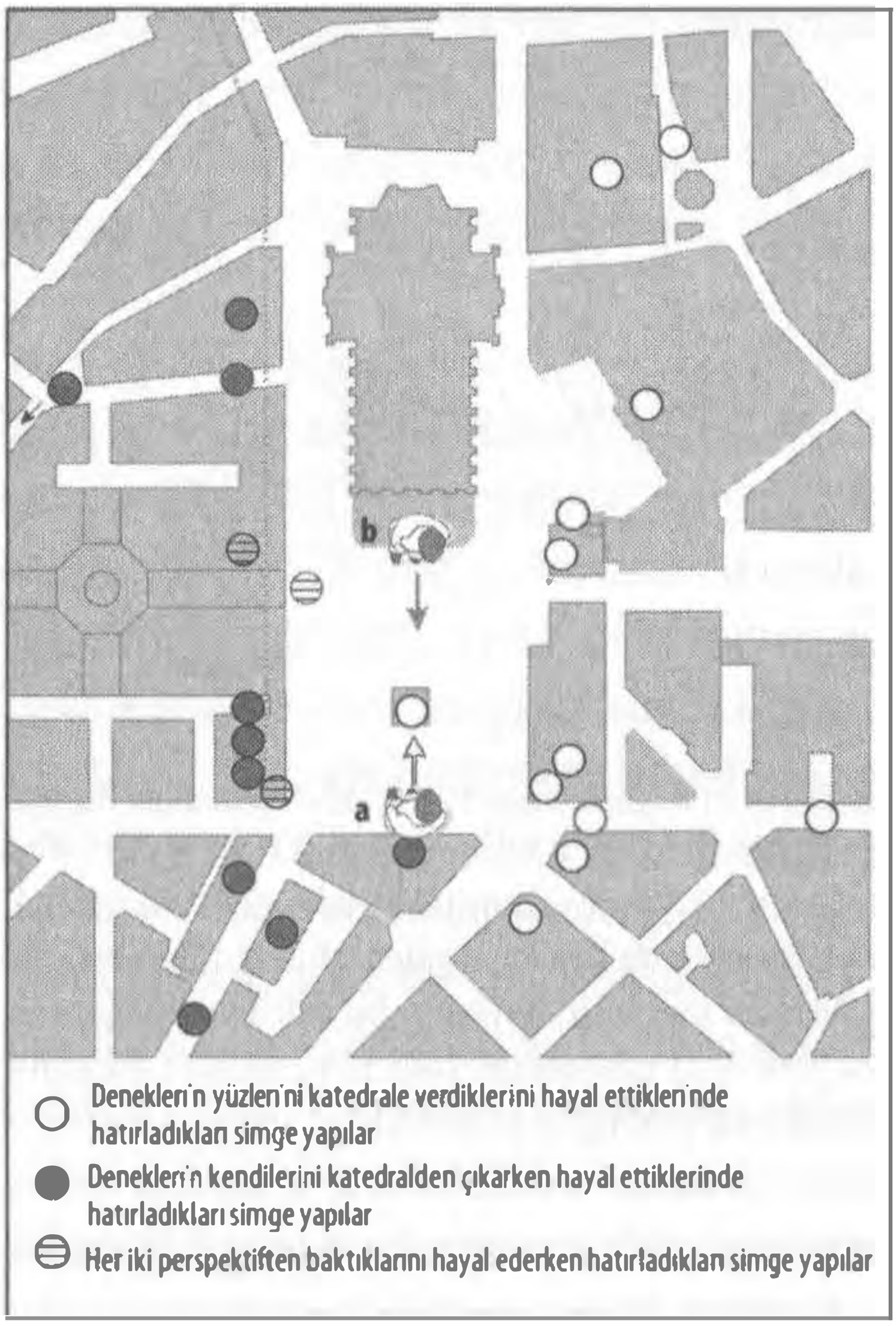
Tuhaf yetersizliklerden biri de, *hatırlanan* unsurlar ve onların mekânsal referans çerçeveleriyle ilgilidir. 1978'de Edoardo Bisiach



Şekil 9.2 Pariyetal kortekslerinin sağ tarafında lezyon olan hastalar, mekânın sol tarafındaki uyaranların lokasyonlarını fark edemez veya net biçimde hatırlayamazlar. Bu hastalar resim çizdiklerinde, resmini çizdikleri nesnenin sol tarafındaki ayrıntıları resme dahil etmezler veya onları resmin sağ tarafına yanlış biçimde yerleştirirler. Hastaların gerçekten görebildikleri anlaşılıyor ama bu kişiler hasarlı tarafla ilgilenmezler, uyaranın özelliklerini ihmal ederler veya bu özellikleri iyi tarafa "kaydırırlar". Şekilde sağ ön pariyetal korteksi hasarlı bir hastanın çeşitli çiçek resimlerini (*a*) onlara bakarak çizme çabası (*b*) görülüyor. Taçyaprakları ile yaprakların yalnızca sağ tarafa çizildiğine, altta, soldaki çiçeğin hiç çizilmediğine dikkat edin.

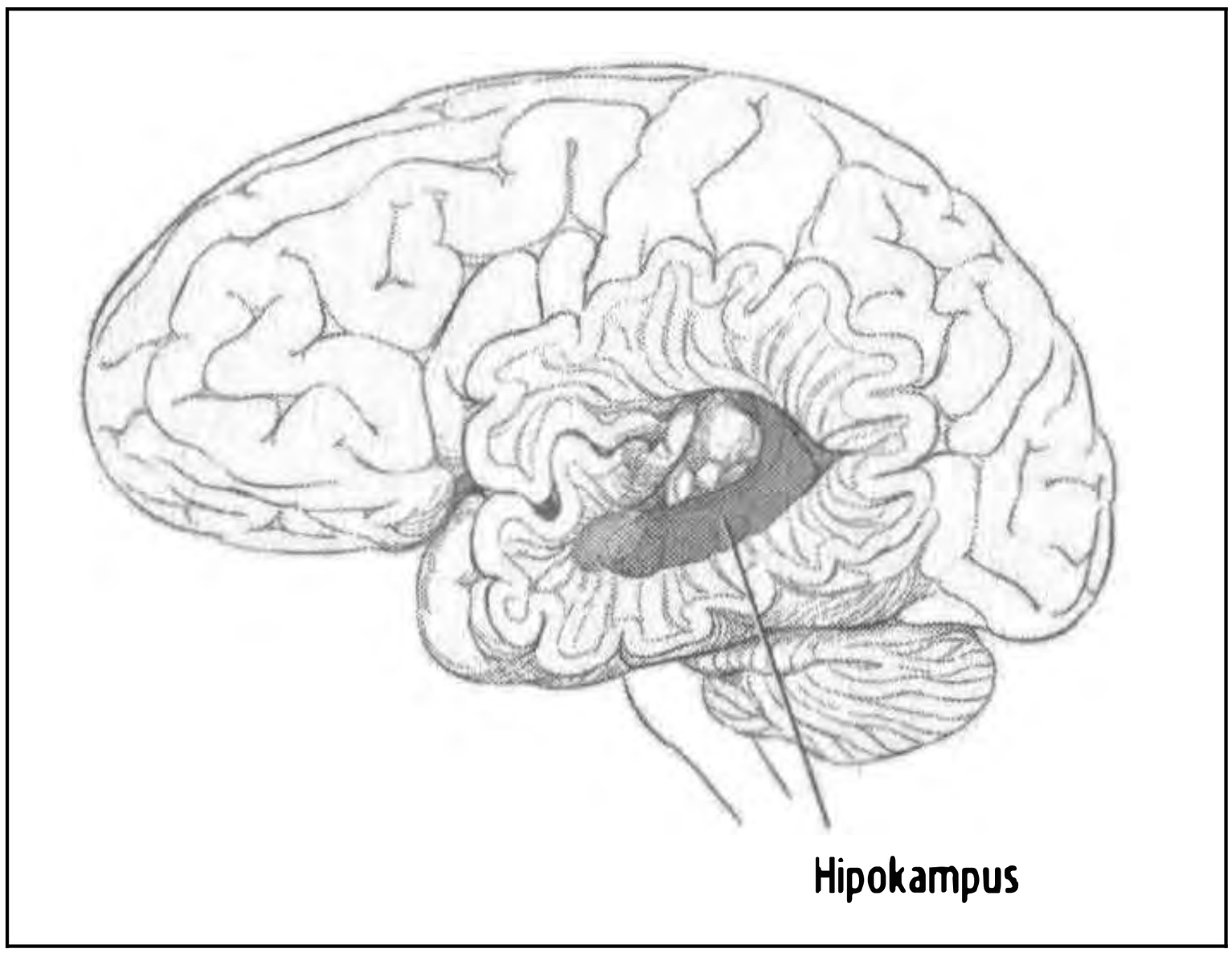
ve Claudio Luzzatti adlı iki İtalyan araştırmacı, pariyetal kortekslerinin bir yarıküresi hasarlı olan hastaların bilinen yerleri nasıl hatırladıklarını test eden bir deney gerçekleştirmişti.[4] Deneklerinden Milan'daki ünlü Piazza del Duomo'nun girişinde olduklarını hayal etmelerini ve meydanın çevresindeki simge yapıları sayabildikleri kadar tek tek saymalarını istemişlerdi. Hastalar meydanın beyindeki hasarlı mekânsal bölgelere karşılık gelen kısmındaki yapıları söylemekte güçlük çekmişlerdi (Şekil 9.3).

Ama işin ilginç yanı şimdi geliyor. Bisiach ve Luzzatti sonra deneklerinden zihinlerinde canlandırdıkları görüntünün perspektifini değiştirmelerini ve kendilerini meydanın diğer ucundan, yani karşı



Şekil 9.3 Sağ pariyetal lobunda lezyon olan hastaların mekân içinde hangi lokasyonları hatırladıkları, hastaların kendilerini nerede hayal ettiklerine bağlı olarak değişir. Edoardo Bisiach ve Claudio Luzzatti'nin incelediği İtalyan hastalar kendilerini Milan'daki Piazza del Duomo'nun girişinde (*a*) hayal ettiklerinde, meydanın sağ tarafındaki simge yapıları (çemberler) hatırlayabilmişlerdi. Meydana ters yönde (*b*) baktıklarını hayal ettiklerinde ise bu sefer ters yöndeki yapıları (daireler) hatırlayabilmişlerdi.

taraftan bakıyormuş gibi hayal etmelerini istemişti. Gözlem noktasındaki bu değişiklik, hayali de olsa, hastaların oradaki simge yapıları meydanın karşı tarafından hatırlamalarını sağlamıştı! Yani anılar oldukları yerde duruyordu, tek sorun onlara ulaşmaktı; anahtarı kaybolmuş kilitli bir çekmecede saklanan belgeler gibi. Görünüşe göre pariyetal korteks bu dosya çekmecesinin kilidinin açılmasında rol oynuyor ve bunu da sahnenin bir mekânsal temsilini sahnenin hayalimizdeki perspektifine dayalı bir referans çerçevesi dahilinde hatırlamamızı sağlayarak yapıyor.



Şekil 9.4 Korteksin dış kısmının altında yer alan denizatı biçimli bölge, yani hipokampus, hem bellekte hem de mekân algısında rol oynar. Farelerin hipokampuslarındaki nöronlarda farelerin ortamdaki konumlarıyla ilgili alıcı alanlar bulunur. Hayvanlarda ve insanlarda hipokampusun hasar görmesi, ciddi bellek kayıplarına neden olur. Mekân algısı ile belleğin bu şekilde eşleşmesi, belleğin mekân algısı oluşturmaya yardımcı olmasının yanı sıra, mekân algısının da anı oluşturmaya yardımcı oluyor olabileceğini gösterir.

Beyin korteksinin alt kısmında kıvrılmış biçimde yer alan denizatı şeklindeki korteks alanı, yani hipokampus, beynin mekân ile bellek arasındaki ilişkinin belki de temeline inen ve bu ilişkinin ayrıntılı şekilde incelendiği bölümüdür (Şekil 9.4). Hipokampusun hasarının önemli bellek sorunlarına neden olabileceği ilk kez 1950'lerde, Henry Molaison adlı hastanın başına gelen talihsiz olayla fark edildi. Molaison yedi yaşında geçirdiği bir bisiklet kazası sırasında başına aldığı darbeden sonra epilepsi nöbetleri geçirmeye başlamıştı. 1953'te beyin ameliyatı geçirmiş, ameliyat sırasında nöbet noktası (beyindeki nöbetleri başlatan bölge) alınmıştı. Alınan kısım, beynin iki tarafındaki medyal temporal loblar, hipokampusun üçte ikisi ve çevredeki bazı beyin yapılarını içeriyordu.

Ameliyat epilepsiyi iyileştirmiş ama bedeli yüksek olmuştu: Ameliyattan sonra Molaison bir daha yeni "bildirimsel" anı, yani olaylar veya durumlarla ilgili bilinçli anı oluşturamadı.* Nöropsikolog Brenda Milner, Molaison'ın hafıza kaybını ayrıntısıyla inceledi ve Molaison'ın HM kısaltmasıyla tanındığı sinirbilim alanındaki şöhreti yayıldı.[5]

Bu kadar ciddi (ve *lokal* bir beyin lezyonun neden olduğu) bir hafıza kaybı, sinirbilim gibi yeni gelişmekte olan bir bilim alanında sürpriz etkisi yarattı. Daha önce, Karl Lashley hatıraların beynin neresinde depolandığını araştırmıştı. Farelerle yaptığı çalışmalarda, farelerin beyinlerinin çeşitli bölgelerinde lezyon yaratmış ve hatırlama gerektiren işlerde farelerin performanslarındaki eksiklikleri ölçmüştü. Hatırlamaya hiçbir bölgenin diğerinden daha fazla etkisi varmış gibi görünmüyordu. Tahrip ettiği beyin dokusunun miktarı arttıkça bunun farenin performansı üzerindeki etkisi de artıyordu.[6]

HM'nin yaşadığı bellek sorunları hipokampusu ve ameliyat sırasında alınan hipokampus çevresindeki beyin bölgelerini tekrar ilgi odağı haline getirdi; hayvan deneyleri de daha çeşitli tekniklerin kullanımıyla hipokampusun rolünün daha iyi anlaşılmasını sağladı. Bir hayvanı belli bir işi (labirente gizlenmiş bir yiyeceği bulmak, suyun hemen altına gizlenmiş bir platforma doğru yüzmek, bir uyaran karşılığında manivelaya basmak vs.) yerine getirecek şekilde eğitebilirsiniz. Ondan sonra, HM'de zarar görmüş olan hipokampus ve diğer bölgelerin hasarlarının etkilerini, "öncesi ve sonrası" şeklinde inceleyebilirsiniz. Normal, hasar görmemiş hipokampustaki nöronların aktivitesi, kayıt yapan elektrotlar kullanılarak, fareler bu işleri yerine getirdikleri esnada da incelenebilir.

1971'de Londra'da iki biliminsanı ilginç bir keşifte bulundu. John O'Keefe ve Jonathan Dostrovsky, farelerin hipokampusundaki nöronların, farenin laboratuvar düzeneğindeki konumuna hassas olduğunu bulguladı.[7] O'Keefe ve Dostrovsky, etrafı kapalı küçük bir alanda serbestçe dolaşan farelerin hipokampuslarına kayıt yapabilen elektrotlar taktı. Fareler bir yerden bir yere hareket ettiklerinde farklı nöronlar faaliyete geçmekteydi. Hipokampustaki bu nöronlar görme nöronları gibi hareket ediyor, alıcı alanları dahilinde bir şey oldu-

* Molaison 2008'de, yirmili yaşlarından sonra yaşadıklarının hiçbirini hatırlamadan, seksenli yaşlarında öldü. Onun kimlik kaybını, aynada gördüğü kişiyi gün geçtikçe tanıyamaz hale gelişini idrak edebilmek zor. Yeni ilişkiler kurarken yaşadığı zorlukları, yeni tanıştığı insanların veya hastabakıcıların isimlerini veya kişiliklerini hiç hatırlayamamanın, ailesi ve ameliyattan önce tanıdığı kişiler birer birer ölürken eski bağları giderek yitirmenin ona neler hissettirdiğini hayal etmek de zor.

ğunda tepki veriyorlardı, ama alıcı alanın içindeki bu "şey" dışsal bir görsel uyarandan ziyade farenin kendisiydi. Araştırmacılar bu fenomene *konum alanı* adını verdiler.

O'Keefe, Lynn Nadel ve başka biliminsanlarının daha sonra yaptıkları araştırmalar, konum alanlarının farenin belli bir konumdayken aldığı belli uyaranları değil, farenin nerede olduğu bilgisini yansıttığını doğruladı.[8] Farenin bulunduğu konumun nasıl koktuğu veya belli bir noktadan hangi görsel uyaranı görebildiği önemli değildi; bu duyusal ipuçları ancak nerede olduğu konusunda fareye yardımcı olduğu müddetçe önemliydi.

New York'ta çalışmalarını sürdüren Robert Muller ve John Kubie ise, gerçekleştirdikleri önemli bir deneyle gösterdiler ki, belirgin görsel işaretler konum alanlarını etkilemekle birlikte, bu işaretlerin ortadan kaldırılması onları yok etmez (s. 111, Resim 10a).[9] Muller ve Kubie, fareleri yuvarlak bir fıçının içine yerleştirmişti. Fıçının her tarafı, üzerinde hiçbir şekil bulunmayan düz siyah perdelerle kaplanmış ve perdelerin bir yerine beyaz dikdörtgen bir kâğıt yerleştirilmişti. Sahnede bu beyaz "ipucu kartı" işaretinden başka yön algısı yaratacak bir şey yoktu. Bundan sonra araştırmacılar, fare fıçının içinde dolaşırken hipokampus nöronlarının tercih ettiği yerlerin haritasını çıkardılar. Sonra fareyi fıçıdan alıp ipucu kartının yerini değiştirdiler, fareyi tekrar fıçıya yerleştirdiler ve konum alanlarını yeniden ölçtüler. İşaret başka bir yere yerleştirildiğinde, konum alanları da onunla birlikte yer değiştirmişti. Bu basit bir görsel tepki olamazdı, çünkü ipucu kartı ortadan kaldırıldığında bile nöronlarda hâlâ konum alanları görülmüştü; ama çoğunlukla konum alanının yeri, farenin yön algısı ortadan kalkmış gibi değişmişti. Bütün bunlar ancak, hipokampusun konum alanları farenin içinde bulunduğunu *hissettiği* yeri yansıtıyorsa anlamlıdır.

Ardından yapılan deneyler, hipokampus kompleksi (hipokampus ve yakın çevresinde bulunan ve hipokampusla bağlantılı korteks bölgelerini içeren parahipokampal girus) içindeki konumla ilişkili sinyallerin portföyünü geliştirdi. Bu tepki örüntülerinden biri *başın yönüne* karşı hassasiyeti içerir (Resim 10b).[10] Başın yönüne karşı hassas olan nöronlar, hareketin başlangıç konumundan bağımsız olarak fare belli bir yöne baktığında veya o yöne doğru hareket etti-

ğinde tepki verirler. Bu sinyallerin bir çeşit iç pusula olduğunu düşünebiliriz. *Izgara hücrelerinin*, yani Çin damasındaki delikler gibi ızgaraya benzer biçimde düzenli olarak tekrar eden örüntülere tepki veren nöronların tepki örüntüsü de ilginçtir (Resim 10c).[11] Böyle bir tepki örüntüsü, farenin ne kadar uzağa hareket ettiğinin izinin sürülmesinde rol oynuyor olabilir.

Hipokampus bölgesinin *iki* temel niteliğe (mekânsal konuma karşı yüksek derecede hassasiyete ve anıların oluşturulmasında yaşamsal bir role) sahip olduğunun ortaya çıkarılması şaşırtıcı bir keşif. Bu iki nitelik neden tek bir yapı içindedir? Bunun cevabı, mekân ile belleğin birbiriyle ayrılmaz bir ilişki içinde olması olabilir. Bu bölümün başlarında belirttiğim gibi, hatırladığımız şeylerin büyük bir bölümü mekânsal bir bileşene sahiptir – arabamızı hangi park alanına park ettiğimizi veya akşam eve arabayla nasıl gideceğimizi hatırlarken olduğu gibi. Mekânsal olmayan anılar bile hatırlanan olayın geçtiği mekânsal lokasyonlara göre *dizinleniyor* olabilir. Eski mezunlar toplantısına gittiğinizde, öğrenciliğinizin geçtiği kampüste yıllar sonra bulunuyor olmak, yurdun ve amfilerin ses ve görüntüleri, oralarda yaşadığınız olayların anılarının sökün etmesine neden olabilir. Mekânsal lokasyon beynin dosyalama sistemi olabilir – ilgili anıların bir araya toplandığı ve ihtiyaç halinde erişilebildiği bir sistem.

Mekânsal tetikleyiciler eski mezun toplantılarında güzel nostaljik anlar yaşamamızı sağlar, ama başka bağlamlarda hayatta kalmamız için temel öneme sahip olabilirler. Örneğin, insanların ve hayvanların yiyecek aramada başarılı olmaları için mekân ile bellek birbiriyle ilişki içinde olmak zorundadır. Yiyeceğini bir şekilde bulmak zorunda olmayan bir hayvan türü düşünülemez. Ayrıca hayvanlar yiyeceklerini gelişigüzel aramazlar, nereye gitmeleri gerektiğini hatırlarlar. Çöl karıncaları bile bunu yapar. Yakın zamanlarda bahçemize kuş yemliği koyduk, kuşlar onu fark ettikten sonra yemliği hatırladılar ve daha sık gelmeye başladılar. Tohum saklayan kuşlar gibi bazı türler yiyecek bulmakla kalmaz, buldukları yiyecekleri daha sonra almak üzere saklar da. Bellek ve mekânsal yiyecek arayışı yalnızca vahşi ortamda yiyecek arayan hayvan veya insanlar için değil, kentlerde yaşayan insanlar için de önemlidir. Bildiğimiz bir süper-

markette alışverişimizi yeni bir süpermarkettekinden daha çabuk bitirebiliriz. Hipokampus bu tür mekânsal yiyecek arayışlarındaki zorlu hatırlama faaliyetlerinde rol oynar; yiyecek saklayan kuşların hipokampusu yiyecek saklamayan aynı türe ait kuşlarınkinden daha büyüktür.[12]

Mekânsal konum, anıları güçlü biçimde canlandırabilir; öyle ki yalnızca bir kez karşılaştığımız bir şeyi hatırlamak için ondan yararlanabiliriz, araya uzun bir zaman girse bile. Evimizden çok uzakta, her yıl yaptığımız kayak gezilerimiz için iki yıl üst üste kayak kiraladığımız bir dükkân var. İkinci yıl, önceki yıl kayakları kiraladığım adamı, onunla sadece on beş dakika vakit geçirmiş ve aradan geçen bir yıl boyunca hiç temas kurmamış olmama rağmen hatırladım. Ama onu başka bir yerde, hatta yine o gün görmüş olsam hatırlayacağımdan şüpheliyim.

Mekânsal bağlam normalde bizi o anda uygun *olmayan* şeyleri hatırlamaya karşı da korur; travma sonrası stres bozukluğu (TSSB) olan hastalarda ise bu süreç ters işler. Bu hastalarda, yaşanmış korkunç bir olayın anıları günlük olaylarda eski travmalarından bağımsız biçimde sürekli araya girer. Savaş bölgesinden evlerine dönen askerler bu tür nahoş anıların konsantrasyonlarını bölmelerine engel olamazlar.

Mekân, aynı zamanda mekânsal bir bağlamla herhangi biçimde ilgili olmayan bilgileri bilinçli olarak belleğe yerleştirme stratcjisi olarak da kullanılabilir. Antik Yunan ve Roma'da uzman ezberciler veya hafıza uzmanları, çok sayıda maddeden oluşan uzun bir listeyi ezberlemek için *mekân yöntemi* adlı bir teknik geliştirmişlerdi. Oyun kâğıtlarının sırasını hatırlamaya çalışan bir hafıza uzmanı, bu tekniği kullanarak her kâğıdı zihninde tanıdığı bir ınekânın belli bir konumuyla ilişkilendirebilir. Örneğin, zihninizde kupa kızını evinizin giriş holüne, sinek dörtlüyü mutfağa ve karo altılıyı garaja yerleştirebilirsiniz. Daha sonra, bu mekânlarda dolaştığınızı hayal ederek her bir oyun kâğıdını çok daha iyi hatırlayabilirsiniz. Bu işlem aynı zamanda bellek sarayı inşa etmek olarak da anılır (ve *anılarda gezinmek* deyişine yepyeni bir anlam kazandırır).

Bu anı türleri (bilincinde ve farkında olduğumuz anılar) bizi *düşünceni*n eşiğine getirir. Beynin mekânsal işlem mekanizmaları ile bellek arasındaki bağlantılar bilişsel aysbergin yalnızca görünen yüzünü oluşturuyor olabilir. 10. Bölüm'de beynin mekânsal mekanizmalarının düşünme ve akıl yürütme yeteneklerimizi etkileme ihtimali üzerinde duracağım. Düşünceyi incelemek, duyu, hareket veya belleği incelemekten daha zordur, dolayısıyla varsayımlar alanına gireceğimiz konusunda sizi şimdiden uyarayım.

10

Düşünmek Üzerine Düşünmek

BU KİTABA beyin gücünüzün onda dokuzunun şeylerin nerede olduğunu anlama çabasına harcandığına dair uydurma bir iddiayla başlamıştım. Bu bölümde, bununla ne demek istediğimi ve bunun nasıl *düşündüğümüz* konusunda kanımca bize ne söylediğini anlatacağım. Dikkat: Bu bölümün bazı kısımları son derece spekülatif olacak.

Önce bir adım geri gidip uğraştığımız sorunun büyüklüğünü idrak edelim. Zihin-beyin ilişkisini araştırmanın karşısındaki en büyük engel, denklemin yalnızca bir tarafını (zihni değil beyni) doğrudan ölçebiliyor olmamızdır. Beyni ölçebilme yeteneğimiz şüphesiz etkileyicidir. Bu kitapta bunun sayısız örneklerini gördünüz, ayrıca sinirbilim alanında yayın yapan bilimsel dergilerin sayfaları benzer birçok araştırmayla doludur. Bu kitaba başlamadan önce belki de varlığından hiç haberdar olmadığınız nöronlardaki eylem potansiyellerini ölçebiliyor ama çok yakından bildiğiniz bir şeyi, düşünmenin zihinsel deneyimini ölçemiyor olmamız bir anlamda ironiktir.

Zihin-beyin denkleminin düşünce tarafının dış hatlarını oluşturmak için elimizdeki ipuçlarını bir araya getirmemiz gerekiyor. Genel olarak, düşünce ve diğer örtülü bilişsel fenomenlerin bazı davranışsal görevlerde kontrol altında olmasını sağlamaya çalışmak gibi bir yaklaşım izlenir. Yani, bilişsel becerilerinizi makul ölçüde tutarlı ve tekrarlanabilir bir şekilde harekete geçireceğini düşündüğü-

müz bir şey yaparız ve bu bilişsel işlemin sonucunu ortaya çıkarmak için sizden davranışsal bir tepki vermenizi isteriz. Kitap boyunca bunun örneklerini gördünüz – özellikle de algı, hareket ve bellek konularıyla ilgili örnekleri. Aynı yöntem dikkat, karar verme ve diğer bilişsel becerilerde de kullanılabilir.

Duyusal, motor ve bilişsel görevlerle ilgili yapılan bu tür araştırmalar ilginç bir gözlem ortaya çıkarır: Nöronlarla beyin bölgelerinin tek bir şey yaptığı nadiren görülür. Nöronlar hem duyusal hem motor aktivite örüntüleri gösterirler. 9. Bölüm'de de gördüğümüz üzere, nöronlarda hem görsel hem de bellekle ilişkili aktivite görülebilir veya nöronlar bellek ile mekânsal navigasyon arasında bir bağlantı sergileyebilir. Bazı araştırmalarda, belli bir uyarana verilen tepkilerin, deneğin uyarana dikkatini verip vermemesine, uyarana aşina olup olmamasına veya uyaranla ilgili sorulan soruya vereceği doğru cevaptan bir ödül beklentisi içinde olup olmamasına bağlı olarak değişebildiği görülmüştür. Nöronlar iki iş birden yapar.

Daha iyi anlamak için meseleyi başka bir yoldan anlatalım. Resim 11'de (s. 112) çeşitli bölgelerin o bölgelerdeki nöronların aktivitelerine göre farklı renklerde gösterildiği bir maymun beyni görülüyor.[1] Korteksin büyük bir bölümü görsel uyaranlara tepki veriyor. Küçük alanlar seslere, dokunsal uyaranlara, kokulara, tatlara ve her çeşit harekete olan hassasiyeti gösteriyor. Bir çeşit duyusal veya motor faaliyet gösteren bölgeler görüntüye hâkim durumda; duyu ve motor bölgelerinden artakalan kısım ise önemsiz bir yer işgal ediyor.

Beynin büyük bir kısmı duyu ve hareketle meşgul olduğundan, sahip olduğumuz diğer birçok bilişsel işlev için beyinde çok az yer kalır. Beynin bellek, dikkat, planlama ve karar verme gibi diğer bilişsel işlevlerde rol oynadığı kanıtlanan bölgelerinin bir haritasını çizmiş olsaydık, bu haritanın Resim 12'deki gibi duyu/motor haritasıyla üst üste çakıştığını görürdük.

Ayrıca, beyinde örneğin *yalnızca* dikkat veya bellek sinyalleri olan, duyu veya motor sinyalleri *olmayan* bir bölge bulunamamıştır. Beyinde, bir lezyonun daha çok dikkat eksikliğine veya hafıza kaybına yol açtığı bölgeler vardır (örneğin dikkat eksikliği pariyetal kortekste, hafıza kaybı hipokampusta gelişen lezyonlarda görülebilir), ama bu bölgelerdeki nöronlar dikkat ve bellekle ilişkili sinyal-

lerin yanı sıra duyu ve motorla ilişkili sinyalleri de taşıyor gibi görünüyorlar.

Bilişsel, duyusal ve motor işlemler arasındaki bu örtüşme, bilişsel işlemlerin kısmen de olsa duyusal ve motor yapılar aracılığıyla gerçekleştiğini ima ediyor olabilir. Yani "düşünmek" aynı zamanda beynin bazı duyu ve motor alt yollarını harekete geçiriyor olabilir. Örneğin, zihninizde oturma odasındaki kanepede oturduğunuzu canlandırdığınızda, bu düşünce belki de orada gerçekten oturuyor olsaydınız gerçekleşecek olan görsel, dokunsal, işitsel, kokusal ve motor tepkilerin kısmen harekete geçmesiyle ortaya çıkıyordur. Düşüncenin beynin duyu ve motor bölgelerindeki aktivite örüntülerinin taklit edilmesini içeriyor olabileceğini ileri süren teori *temellendirilmiş* veya *biçimlendirilmiş idrak* olarak adlandırılır.[2]

Bu görüşü destekleyen kanıtlardan bazıları, bir şeye nasıl tepki verdiğinizin duyusal uyaranların o şeyle alakasızmış gibi görünen özelliklerine bağlı olduğunu gösteren davranış deneylerinden elde edilmiştir. Burada özellikle vurgulanması gereken önemli bir unsur var, o da alakasızmış gibi görünen bu özelliklerin çoğunlukla mekânı içeriyor olması. Klasik bir deneyde, Plymouth Üniversitesi'nden Mike Tucker ve Rob Ellis deneklerden gösterilen nesnelerin baş aşağı mı yoksa düz mü durduğunu ifade etmelerini istemişti.[3] Uyaranlar kızartma tavaları ve spatulalar gibi bilinen ev eşyalarının fotoğraflarından oluşmaktaydı. Deneklerden cevaplarını biri düz biri baş aşağı cevabı için tasarlanmış iki düğmeden birine basarak vermeleri istenmişti. Düğmelerden biri deneğin sol eline, diğeri sağ eline yakın bir yere konmuştu; normalde önemli görmeyebileceğimiz bu ayrıntı Tucker ve Ellis'in amaçladıkları şey için temel bir öneme sahipti.

Aslında Tucker ve Ellis düz/baş aşağı seçenekleriyle ilgilenmiyordu; asıl ilgilendikleri şey deneklerin fotoğraftaki nesnenin *sapıyla aynı tarafta* olan düğmeye daha hızlı basıp basmayacaklarıydı ve bu niyetlerini deneklerden gizlemişlerdi. Nesnelerin hepsinin sapı vardı ve çeşitli yönlerde fotoğraflanmışlardı: Kimi yukarıya bakıyor ve sağa veya sola yakın duruyor, kimi aşağıya bakıyor ve sağa veya sola yakın duruyordu. Tucker ve Ellis, kızartma tavasının sapı solda olduğunda, sol eli içeren tepkilerin sağ eli içeren tepkilerden daha

hızlı olduğunu görmüştü. Doğru seçenek el ile sap arasında eşleşme yapmayı içerdiğinde deneklerin daha az hata yaptıkları da gözlemlenmişti ayrıca. Nesneler tam tersi şekilde verildiğinde tepki örüntüsü de tersine dönmüştü, ki bu da meselenin bir elin diğer ele göre daha hızlı olmasıyla alakalı olmadığını gösterir.

Mekân ile idrak arasında ilgisiz olduğu düşünülen bir ilişkinin varlığını gösteren başka bir klasik örnek *zihinsel döndürme* deneylerinden gelir. Yapılan ilk deneylerden birinde Roger Shepard ve Jacqueline Metzler deneklere farklı şekillerde blokların (Tetris gibi ama onun üç boyutlusu) tasvir edildiği resimler gösterilmiş ve onlardan iki resimde farklı açılardan görünen aynı şeklin mi yoksa farklı şekillerin mi yer aldığını söylemelerini istemişti.[4] (2. Bölüm'de fotopigment molekülünün ışığa göre dönmesini zihninizde hayal ederken siz de zihinsel döndürme yaptınız.) Araştırmacılar, deneklerin karar verme sürelerinin gerçekte iki nesnenin hizalanması için gereken dönüş sayısıyla orantılı olduğunu görmüşlerdi.

Her ne kadar tamamen davranışla ilgili olsa da bu iki deney, akıl yürütmelerde gerçek dünyadaki mekânsal kısıtlamaların belirtilerinin görülebileceğini ortaya koyar. Kızartma tavası deneyinde, tavanın sapının bir yöne daha yakın oluşunun cevapları etkilememesi gerekirken (deneklerin yapacakları şey kızartma tavasının ters mi düz mü durduğunu ifade etmekten ibarettir) etkiler. Zihinsel döndürmede, döndürülen fiziksel bir nesne yoktur ama yine de bu işi yaparken harcanan süre aynı nesnenin gerçek olması halinde kaç kez döndürülmesi gerektiğine göre değişir.

İnsan beyninin faaliyetlerinin incelenmesine olanak tanıyan görüntüleme tekniklerinin gelişimiyle birlikte, bu tür bir fenomenin nöral temeline dair bazı ipuçları ortaya çıkmıştır. Bazı araştırmalar, görsel bir uyaranı zihinde canlandırmanın birincil görsel kortekste faaliyete yol açtığını, dahası bu faaliyetin miktarının zihinde canlandırılan nesnenin büyüklüğüne göre değişiklik gösterdiğini (görsel bir uyaranı zihinde canlandırmanın görsel korteksin mekân haritasıyla ilişkili olduğunu) göstermiştir.[5]

Dil uyaranlarını içeren araştırmalar da mekâna dair duyusal-motor işlemlerle sözcüklerin anlamı arasında ilginç bağlantılar olduğunu ortaya koymuştur. Olaf Hauk, Ingrid Johnsrude ve Friedemann

Pulvermüller, deneklere farklı kategorilerde sözcükler gösterdiklerinde beynin hangi bölgelerinde faaliyet değişiklikleri olduğunu araştırmış.[6] Araştırmacılar, belli eylem türleriyle ilişkili sözcüklerin o eylemlerin kontrolünde etkili olduğu düşünülen nöronlarda tepki oluşmasına yol açtığını bulgulamışlar. Örneğin, *tekmele* veya *yürü* gibi sözcükler motor korteksin ayak bölgesi yakınındaki nöronların faaliyetlerinde, *yala* veya *konuş* gibi sözcükler de ağız bölgesi yakınındaki nöronların faaliyetlerinde değişikliğe neden olmuş. Başka bir araştırmada, renklerle ilişkili sözcüklerin görme yollarında faaliyete neden olduğu görülmüş.[7] Bu tür araştırmalar, bir sözcüğün taşıdığı anlam üzerinde düşünürken, beyninizin o anlamla ilişkili duyusal ve motor faaliyetleri kısmen yeniden oluşturmaya çalıştığı fikrini destekler.

Duyusal-motor işlem ile düşünce arasında çift taraflı bir görevin söz konusu olduğu fikri, somut kavramlarda gayet mantıklıdır, zira burada düşünce ile gerçek hayatta yapıldığında fiziksel olarak deneyimleyeceğiniz şey arasında net bir ilişki vardır. Ama bu teori zekice bir yaklaşımla, düşüncenin daha soyut biçimlerine doğru genişletildi. Bilişsel bilimci George Lakoff ve felsefeci Mark Johnson, soyut düşüncede metaforlar aracılığıyla duyusal ve motor yapıtaşlarından yararlandığımız görüşünü ortaya attı.[8]

Metaforun edebiyatta bir hikâyeyi canlı ve ilgi çekici kılmak için yararlandığımız bir şey olduğunu düşünürüz çoğunlukla. Ama soyut bir şeyi somut bir şeye bağlamak idraka da yardımcı olur. Aslında kitap boyunca bilerek yaptığım bir şey bu.[9] Görgü tanıkları ile duyu reseptörleri arasında (7. Bölüm), Sherlock Holmes ile beynin sesin lokasyonlarıyla ilgili çıkarımları arasında (5. Bölüm), dosya dolapları ile bellek arasında (9. Bölüm) ve daha pek çok şey arasında kurduğum analojilerden yararlandım. Bilerek kurulan bu analojiler aşina olmadığınız ve size anlaşılmaz gelen şeyleri zihninizde canlandırmanızı sağlamış olmalı; en azından öyle olduğunu umuyorum.

Lakoff ve Johnson, soyut olanla somut olanı birbirine bağlayan metafor dilinin yaygın olduğunu ve "sıcak gelişme" veya "büyük bir isim" gibi deyişlerle gündelik konuşmalarımıza nüfuz ettiğini belirtir. Bu metaforik bağlantılar tutarlı örüntüler de izler. Örneğin, duygular çoğunlukla sıcaklık içeren mecazlarla dile getirilir ("sıcak

çatışma", "soğuk tavır", "sıcak karşılama" gibi). Emory Üniversitesi'nden Krish Sathian ve ekibinin gerçekleştirdiği, Hauk ve meslektaşlarının vücutla ilgili somut sözcükleri içeren araştırmalarına benzer bir araştırmada, deneklere dokunsal metaforların kullanıldığı cümleler ("Cildi kösele gibi olmuş") ile aynı cümlelerin dokunmayla ilgili deneyimler içermeyen düz hali ("Cildi sert olmuş") okutulduğunda somatosensori korteklerinde faaliyet değişiklikleri görülmüş.[10]

Gündelik dilde kullanılan metaforların çoğunlukla mekânla ilgili olması da çok ilgi çekicidir. Örneğin, zamana çoğunlukla mekânsal dil kullanılarak atıfta bulunulur ("önümüzdeki günlerde", "artık sınavlar geride kaldı").[11] Toplumsal bağlarla ilgili ifadelerde de çoğunlukla mekânsal vurgular görülür ("yakın arkadaşım", "uzak akraba"), tıpkı toplumsal rütbelerde olduğu gibi ("alt sınıf", "üst düzey yetkili"). Müzikte ses frekansı ile mekân arasında fiziksel bir ilişki olmadığı halde perdeler için yüksek ve alçak sözcüklerini kullanırız.

Buna karşılık, mekânsal temsillerimizin doğası da mekânla ilişkili mekânsal olmayan soyut alanlardaki muhakemelerimizi şekillendiriyor olabilir. Bilişsel bilimci Lera Boroditsky, mekân tanımında kültürlerarası farklılıklar olduğunu, insanların ait oldukları kültürdeki mekân tanımının zihinlerinde zamanı temsil ediş biçimini etkilediğini ileri sürüyor. Örneğin, konuşma dili İngilizce olan insanlar, yakın yerleri tarif ederken kendilerini odağa alan bir referans çerçevesi kullanırlar (solda, sağda, önde, arkada gibi). Avustralya'daki Pormpuraaw adlı Aborijin topluluğunda ise mekân tarifinde ana yönler (kuzey, güney, doğu, batı) kullanılır. Boroditsky, Amerikan İngilizcesi konuşanlar ile Pormpuraawların belli bir zamansal düzen içinde meydana gelen olayları tasvir eden kartları fiziksel olarak nasıl düzenlediklerini test eden bir deney gerçekleştirmiş.[12] Amerikalılar, yüzleri hangi yöne dönük olursa olsun, kartları kendilerini referans alarak soldan sağa doğru düzenlemişler. Pormpuraawlar ise yüzleri hangi yöne dönük olursa olsun, kartları genelde doğudan batıya doğru düzenlemişler!

Bu araştırmalar, mekânın zihinsel temsillerinin duyusal ve motor alanlar tarafından yönlendirilmekle kalmadığını, bu alanların soyut alanda düşünceyi şekillendirebildiğini de gösteriyor. Bilişsel bece-

rilerimizin evrimiyle ilgili teorilere bakıldığında bu mümkün görünüyor. Evrim sürecinde beyin gittikçe karmaşıklaşmıştır. Beynin evrimiyle ilgili teoriler, insanların ve "zeki" hayvanların sergilediği gelişmiş bilişsel becerilerin, başlangıçta başka amaçlara hizmet etmek üzere evrimleşmiş olan nöral yapıtaşlarından oluşturulduğunu ileri sürer. Örneğin bir mutasyon sonucu belli bir beyin bölgesi koptalanmış olabilir. Bu yeni beyin bölgesi sonra yeni bir rol üstlenebilir veya yeni bir beceri için zemin oluşturabilir; ama bunu yapabilmesi, bu beyin bölgesinin özgün halinin özgün görevi bağlamında evrimleşmiş olan lokal yapıların ve düzenleyici ilkelerin de (devreler ve bağlantı örüntüleri gibi) bu sürece dahil olmasını gerektirir.

Bu durum, düşünme ve muhakeme yeteneklerimizin birçok yönünün, başlarda duyusal ve motor işlemler bağlamında evrimleşmiş olan nöral donanımın doğası tarafından şekillendirilmiş olabileceğini ima eder. Bunun ne anlama gelebileceği, yani mekâna dair ne tür duyusal/motor ölçümlerin verimli biçimde idrak alanına uygulanabileceği üzerinde biraz düşünelim.

2. ve 4. Bölümlerde gördüğümüz üzere, kritik önemde iki görsel tepki özelliği vardır: alıcı alan (mekân içinde nöronun tepki verdiği yer) ve görsel özelliklere yönelik seçicilik (görsel sahnedeki sınırların konumlarına karşı hassasiyet gibi). Sinyaller görme yolunda ilerledikçe görsel alıcı alanların karmaşıklığı artar, insan yüzü gibi daha ayrıntılı görsel uyaranlara karşı gelişmiş tepkiler sergilerler (inferotemporal kortekste bulunan bir özellik). Seçiciliğin artmasına yönelik bu sürecin son noktası, *kavramları*, onların ortaya çıkışına neden olan duyusal ipuçlarından bağımsız biçimde ayarlanak olabilir mi? İnsan hipokampusunda yapılan ve belli kişilerin görsel uyaranlarına hassas nöronların bulunduğunu gösteren kayıtlar bu teoriyi destekliyormuş gibi görünüyor.[13] Örneğin, bir nöronun oyuncu Jennifer Aniston'a ait çeşitli fotoğraflara tepki gösterdiği saptanmış. Başka bir nöron da en fazla tepkiyi Halle Berry'nin imgelerine göstermiş; bu nöronun "gözde" uyaranı ise oyuncunun ekranda görünen adıymış. Bu tür bir tepki örüntüsü tümüyle görsel bir tepki olarak değerlendirilemez, çünkü söz konusu uyaranlar birbirinden çok farklıdır. Bu daha çok kavramsal düzeyde bir tepki olmalı; bu kavrama "fikir olarak Halle Berry" diyebiliriz mesela.

İlk bakışta bu durum kavramsal alanda bir çeşit haritanın varlığının kanıtıymış gibi görünse de, bir sorun var: Beyinde tanınabilir her görsel uyaran veya kavrama uygun bir nöronun olmasını mümkün kılacak kadar nöron yoktur. Dolayısıyla, tanıyabileceğimiz her uyarana (veya düşünebileceğimiz her kavrama) uygun bir nöronun olabileceği fikri, bu saf haliyle, doğru olamaz. Ama 6. Bölüm'de beyin haritaları ile dijital kodlar arasında kurduğum paralelliği hatırlayın. Bir görsel mekân haritasında, faaliyetin yeri uyaranın lokasyonunu ifade eder; dijital bir kodda ise anlamı ifade eden, bitlerin *kombinasyonudur*. Alıcı alana benzeyen bir örgütlenmenin oluşturduğu esnek kombinasyonlar, birçok farklı uyaranı/nesneyi/olayı/fikri tanıma ve düşünme yeteneğimizin ortaya çıkışı için gerekli kombinasyonel gücü sağlıyor olabilir.

Hipokampustaki konum alanları (9. Bölüm) bu kombinasyon gücünü sergiler. Tekil nöronlar farklı birçok ortamda farklı yerlere uyumluluk gösterir. Her ortam kısmen örtüşen kısmen ayrı olan nöron kümelerinde faaliyet başlatır. İlkesel olarak, farenin hangi ortamda olduğu ve o ortamın hangi yerinde bulunduğu bilgisi, aktif olan nöronların toplam örüntüsünden elde edilebilir. "Jennifer Aniston" nöronları aynı zamanda hipokampusta da bulunur ve bu nöronlar belki de bu konum alanlarıyla benzer özellikler gösteriyordur. Yani, belki birçok nöron Jennifer Aniston'a tepki veriyordur ve bu nöronların her biri aynı zamanda bu durumla alakasız bir dizi kavram kategorisine de tepki veriyordur (her nöronun tepkisi farklı olacaktır elbette). Bir nöronun faaliyet örüntüsünden ziyade nöron *topluluğunun* toplam faaliyet örüntüsü belli bir kavram kategorisine karşılık gelecektir.

Bu dağıtılmış, kombinasyonel kodlama fikri, birbiriyle ilişkisiz kavramlarda akla yatkın görünüyor. Ama bazı kavramlar birbiriyle sistemli bir ilişki içindedir. Örneğin gölet, göl ve okyanusun hepsi farklı büyüklükte su kütleleridir. Halat, ip ve sicim, bir araya getirilmiş farklı dayanıklılık ve kalınlıkta liflerden oluşur. Kızgınlık ve hiddet, öfkenin farklı dereceleridir. Hısım ve akrabalarınızın içinde, en iyi arkadaşınızdan uzak akrabalarınıza kadar aranızda çeşitli derecelerde bağ bulunan kişiler yer alır. Bu tür ilişkili kavramlarda harita benzeri veya sayaç benzeri nöral kodlar mı kullanılır? Bilmiyo-

ruz ama kesinlikle mümkün. Bu tür kodlar, düzenli bir çeşitlilik arz eden bilgiyi işlemek için çok uygundur – bu ise yalnızca mekânsal alanda değil, çok çeşitli kavramsal alanlarda da gerçekleşir.

Hem kavramsal hem duyusal alanlarda görülen bir başka ilişki de *karşıtlıktır. İyi* ve *kötü* gibi zıt anlamlı sözcükleri veya *memnun değilim* gibi olumsuzlama tabirlerini düşünün mesela. Bunlar gibi sözcük ve tabirler iki kavram arasındaki karşıtlığı vurgular. Karşıtlığa benzer şeyler toplumsal ilişkilerde de olabilir; bu belki de dostu düşmandan ayırma kabiliyetimizin sonucunda ortaya çıkan bir şeydir.

Daha önce, görsel nöronların görsel dünyadaki aydınlık ve karanlık bölgeler arasındaki kontrastı (4. Bölüm'deki benek sensörleri gibi) vurguladığını ve bu özelliğin uyarı ile ketlemeyi dengeleyen, dikkatle inşa edilmiş bir devreden kaynaklanıyor olabileceğini gördük. Kavramsal veya toplumsal karşıtlığın kodlanması belki de nöral devreyi benzer bir biyopolariteyle çalıştırıyordur. Vücut konumu algısında gördüğümüz ve karşıt iki kastan gelen sinyalleri içeren itme-çekme tarzı bir kodlama kullanılıyordur belki de.

Bu fikirleri test etmek zordur ve insanlardaki nöron tepki örüntüleri üzerinde geniş çaplı bir çalışmayı gerektirir kuşkusuz; bu çalışma da ancak beyin ameliyatı olan hastalarda ve ameliyat sırasında yapılabilir. Ama böyle veriler çok değerli bilgiler elde edilmesini sağlayacaktır. Mesela şu Jennifer Aniston nöronu, Aniston'ın imgelerine sadece eski sevgilisi Brad Pitt yanında olmadığı zaman tepki veriyordu.

Mekânsal işlem ile düşüncenin nöral donanımları arasında bir başka paralellik de kavramların birbiriyle kurduğu bağlantı biçimlerinde görülür. Düşünceler bir zincir halinde ortaya çıkar ve izlenebilecek birçok yol vardır. Örneğin kediler hakkında düşünürken, "kediler fare yer" diye de düşünebilirsiniz, "kediler sudan nefret" eder diye de. Bu iki düşünceden hangisine sahip olduğunuz bağlama bağlıdır. Bir kemirgen istilasıyla mı baş etmeye çalışıyorsunuz, yoksa hafta sonu çıkacağınız bir deniz yolculuğuna kedinizi de beraberinizde mi götürmek istiyorsunuz? Ama düşüncenin temel karakteri yine kombinasyoneldir. Beyin düşünme kabiliyetine sahip olduğumuz çok çeşitli kavramları temsil etmekle kalmayıp bunları esnek

ve bağlamına uygun biçimde birbiriyle ilişkilendirme yeteneğine nasıl ulaşır?

Bu sorun, 7. Bölüm'de ele aldığımız referans çerçevesi sorununa benzer. Orada da gördüğümüz gibi, bir mekânsal referans çerçevesi içinde bulunan ve başın konumuna göre tanımlanan belli bir nokta, gözlerin konumuna göre tanımlanan herhangi bir noktaya karşılık gelebilir. Yani beyin bir alandaki her bir konumu, diğer alandaki her bir konumla ilişkilendirebilecek durumda olmalıdır. Ayrıca beyin, her bağlamda bu bağlantılardan yalnızca birini seçmek zorundadır (gözlerin başa göre olan konumunu temel alarak). Kavramlar arasındaki hızlı ve esnek bağlantıları mümkün kılan şey, duyu uyaranlarının bu eşgüdümlü dönüşümlerinde kullanılana benzer bir nöral donanım olabilir belki.

Referans çerçevelerinde etkin olan nöral devrenin başka amaçlar için de kullanıldığı fikrini destekleyen kanıt, matematik alanından ve pariyetal korteksten gelmiştir. Pariyetal korteksin, referans çerçeveleri arasında gidip gelen bilgilerin yorumlanmasında rol oynadığının düşünüldüğünü hatırlayın (örneğin, 9. Bölüm'de pariyetal lezyonları olan hastaların simge yapıları kendi gözlem noktalarına göre hatırladıklarını görmüştük). Ama pariyetal korteks matematiksel düşünmede de (son derece kombinasyonel bir işlem) önemli görünüyor. İnsanlarda, pariyetal korteks lezyonları matematik yeteneğinde eksikliklere neden olur (*hesap yitimi* adıyla bilinen bir durum). Her ikisinin altında da bu iki özelliğe hassas olan pariyetal nöronlar yatıyor olabilir. Araştırmacılar gösterilen maddelerin sayılarına hassas nöronların yanı sıra başa ve gözlere bağlı alıcı alanları olan pariyetal nöronlar da tespit ettiler.[14] Dolayısıyla, uyaranların mekânsal konumlarıyla ilgili bilgiler ile uyaran sayısını bildiren bilgiler, aynı beyin bölgesindeki nöronların ateşleme örüntüleri içinde yer alıyor. Matematiğin sayıların sonsuz şekillerde birleşebildiği son derece kombinasyonel bir idrak biçimi olduğu düşünülürse şaşırtıcı bir şey değildir bu belki de.

TAM BU NOKTADA bir şerh düşmek gerekiyor. Beyindeki duyusal ve motor sinyallerle bilişsel işlev arasındaki çakışmanın derecesi, duyusal veya motor sistemle ilgili görünen her şeyin mutlaka *algılama* veya *harekete* dahil olması gerekmediğine işaret eder. Bu sinyaller gerçekten ikisini de (aynı anda) yapsaydı, o zaman aynı anda hem düşünmeniz *hem de* duyusal sahnenizi denetlemeniz imkânsız olurdu. Yoğun düşünme eylemlerimizi kütüphane gibi sessiz yerlerde, dikkatimizi çok fazla dağıtmayan sakin duyusal sahnelerin olduğu ortamlarda gerçekleştirmeyi tercih etmemizin nedeni budur belki de. Ama bir yandan duyularımızla çevremizi algılayıp hareket ederken bir yandan düşünebildiğimiz de kesindir.

Hangi duyusal tepki bölgelerinin algılamada, hangilerinin düşünmede duyu benzeri sinyallerin kullanılmasında rol oynadığı şu anda tam bir muamma. Hangi nöronların gerçekte duyumsama "için", hangilerinin düşünme "için" olduğunu belirlemek, nöral aktiviteyi manipüle eden deneyler yapmayı gerektirir. Örneğin, 4. Bölüm'de görsel hareket bölgesi MT'nin elektrikle uyarılmasını içeren deneylerden söz etmiştik. Bu deneyler, MT nöronlarının yapay olarak harekete geçirilmesinin algısal ve motor işleri nasıl etkilediğini test etmekteydi. İnsanlarda, bu genel alan yalnızca denekler hareket eden gerçek uyaranları gözlerken değil, aynı zamanda hareket içeren (sabit!) cümleler okurken de faaliyet belirtileri gösterir.[15] O halde, MT bölgesinin uyarılması görsel hareket hakkında düşünmeyi veya zihinde görsel hareketin metaforik biçimde kullanılmasını da etkileyebilir mi? Bu örnekte bunu bilmiyoruz, ama başka araştırmalar *transkraniyal manyetik stimülasyon* adı verilen bir teknik kullanılarak duyusal ve motor yapıların faaliyetini geçici bir süre durdurmanın, yukarıda sözü edilen zihinsel döndürme görevi gibi bilişsel görevlerde performansı bozabildiğini göstermiştir.[16]

Algı ile düşünceyi ayıran çizgi net olmayabilir. Rüya görürken, gerçek fiziksel olayların tetiklemediği ama o sırada son derece gerçekmiş gibi görünen çeşitli duyusal algı deneyimleri yaşarız. Şizofreni gibi zihinsel bozukluklarda hastalar halüsinasyonlar, düşünce süreçlerine zorla giren doğru olmayan algılar yaşarlar. Bu halüsi-

nasyonlar ikna edici biçimde bir düşünceymiş gibi ortaya çıkabilir ve dışsal bir uyaran zannedilebilir. Aslında, gerçek ile hayali olanı birbirinden ayırt etme yetersizliği hastalığın tanımlayıcı bir özelliğidir.

Algılama ile düşünme arasındaki sınırın bu belirsizliği, algıladığınız şeyin düşündüğünüz şeyi veya düşündüğünüz şeyin algıladığınız şeyi biçimlendirmede önemli olduğu anlamını taşır. Öfkeyi düşünmesi istenen denekler kırmızı renge karşı daha hassas hale gelirler (bu duyguyla özdeşleştirilen yaygın bir metafordur bu).[17] Bazı araştırmalar da, yalnızlık duygusunun (sosyal soğukluğun) duşun fiziksel sıcaklığıyla giderilebildiğini göstermiştir.[18]

Düşüncelerin algısal ve motor uyaranlarla harekete geçirilmesi, bunun yaratıcılıkla bir ilişkisinin olabileceğini gösteriyor. Zor bir sorun üzerinde çalışırken, nöral altyapıma yönelik duyusal ve motor talepleri sınırlamak için öncelikle çalışma mekânı olarak kütüphanenin sessiz ortamını tercih ederim. Ama takılıp kaldığımda, ayağa kalkıp etrafta dolaşmanın, duyularımı ve motor sistemlerimi kullanmanın ve deneyip doğru olmadığını anladığım düşünce örüntüsünden sıyrılmaya çalışmanın işe yaradığını biliyorum. Aslında bu, egzersizin bilişsel faaliyetlere önemli katkılarından biri olabilir: Zira egzersiz hem hareket hem de çoğunlukla mekân içindeki harekete eşlik eden zengin bir duyusal deneyim içerir.

Son olarak, düşüncelerimiz birlikte çalışan duyu ve motor sistemlerimizin özgün amacından kaynaklanan sınırlamalardan muzdarip olabilir. Aşina olmadığımız bir fikrin aşina olduğumuz bir fikirle açıklandığı analojik akıl yürütmenin karışık faydalarını düşünün. Beynin bilgisayara benzediğini söyleyebiliriz. Bu analoji, beynin ve bilgisayarın girdileri işleyip çıktı üretebilmesi gibi birbirine benzer özelliklerin başarıyla aktarılmasını sağlar. Ama bu analoji aynı zamanda kısıtlayıcıdır da, çünkü bilgisayarların bazı özellikleri beyne uymaz (beyni fişe takmak gerekmez mesela).

Beyinde nasıl temsil edildiklerine bağlı olarak belli tür kavramlar daha anlaşılır veya belirgin hale getirilebilir, tabii eğer bu kavramlar için kullanılan duyu-motor metaforu onlara uygun bir metaforsa. Diğer kavramlar belli bir amaçla oluşturulmuş bu temsillere uygun olmayabilir, dolayısıyla bu kavramları takip etmek zor olabi-

lir. Alışkanlık haline getirdiğimiz metaforlar ve analojiler bizi engelleyen, düşünce süreçlerimizi kısıtlayan zincirler olabilir. Ama öyle olsa bile bu teori ilginç bir çözüm de sunar bize: Bilinçli olarak farklı duyu-motor analojileri üretmeye çalışmak kafamızı bulandıran en büyük sorunlarla ilgili yeni içgörüler kazamamızı sağlayabilir.

Notlar

2. Işığın Yolları

1. D. C. Lindberg, *Theories of Vision from al-Kindi to Kepler* (Chicago: University of Chicago Press, 1981).
2. A. M. Smith, *Alhacen's Theory of Visual Perception: A Critical Edition, with English Translation and Commentary, of the First Three Books of Alhacen's* De Aspectibus, *the Medieval Latin Version of Ibn Al-Haytham's* Kitab Al-Man zir (Philadelphia: American Philosophical Society, 2001).
3. J. Kepler, *Optics: Paralipomena to Witelo and the Optical Part of Astronomy*, çev. W. H. Donahue (Santa Fe, NM: Green Lion Press, 2000), 6.
4. Bu olayın insan algısıyla ilişkisine dair daha fazla bilgi için bkz. G. Westheimer'ın "Irradiation, border location, and shifted-chessboard pattern" başlıklı yazısı, *Perception 36* (2007): 483-94.
5. R. Descartes, *La Dioptrique* (1637).
6. *A.g.y.*
7. G. M. Stratton, "Vision without inversion of the retinal image", *Psychological Review* 4 (1897): 341-360, alıntı 344. sayfadan.
8. *A.g.y.*, s. 345.

3. Kendi Şeklimizi Hissetmek

1. Başka muhtemel açıklamalar için bkz. E. A. Lumpkin ve M. J. Caterina, "Mechanisms of sensory transduction in the skin", *Nature* 445 (2007): 858-65.
2. Ama bazen eylem potansiyelleri değişiklik gösterir. Bkz. M. C. Quirk ve M. A. Wilson, "Interaction between spike waveform classification and temporal sequence detection", *Journal of Neuroscience Methods* 94 (1999): 41-52.
3. J. R. Lackner, "Some proprioceptive influences on the perceptual representation of body shape and orientation", *Brain* 111 (1988): 281-97.
4. J. M. Groh ve D. L. Sparks, "Saccades to somatosensory targets. I. Behavioral characteristics", *Journal of Neurophysiology* 75 (1996): 412-27.

4. Beyin Haritaları ve Benekler

1. C. W. Oyster, E. S. Takahashi ve D. C. Hurst, "Density, soma size, and regional distribution of rabbit retinal ganglion cells", *Journal of Neuroscience* 1 (1981): 1331-46.
2. D. H. Hubel ve T. N. Wiesel, "Receptive fields of single neurons in the cat's striate cortex", *Journal of Physiology* 148 (1959): 574-91.
3. H. Zhou, H. S. Friedman ve R. Von Der Heydt, "Coding of border ownership in monkey visual cortex", *Journal of Neuroscience* 20 (2000); 6594-611.
4. W. Penfield ve T. Rasmussen, *The Cerebral Cortex of Man: A Clinical Study of Localization of Function* (New York: MacMillan, 1950).
5. V. S. Ramachandran ve S. Blakeslee, *Phantoms in the Brain: Probing the Mysteries of the Human Mind*, New York: William Morrow and Company, 1998; Türkçesi: *Beyindeki Hayaletler: İnsan Zihninin Gizemlerine Doğru*, çev. Levent Öztürk, İstanbul: Boğaziçi Üniversitesi Yayınları, 2011.
6. B. L. Sabatini ve W. G. Regehr, "Timing of synaptic transmission", *Annual Review of Physiology* 61 (1999): 521-42.
7. J. Zihl, D. von Cramon ve N. Mai, "Selective disturbance of movement vision after bilateral brain damage", *Brain* 106 (2) (1983): 313-40.
8. F. A. Azevedo, L. R. Carvalho, L. T. Grinberg, J. M. Farfel, R. E. Ferretti, R. E. Leite, W. Jacob Filho, R. Lent ve S. Herculano-Houzel, "Equal numbers of neuronal and nonneuronal cells make the human brain an isometrically scaled-up primate brain", *Journal of Comparative Neurology* 513 (2009): 532-41.
9. J. M. Groh, R. T. Born ve W. T. Newsome, "How is a sensory map read out? Effects of microstimulation in visual area MT on saccades and smooth pursuit eye movements", *Journal of Neuroscience* 17 (1997): 4312-30.
10. C. D. Salzman, K. H. Britten ve W. T. Newsome, "Cortical microstimulation influences perceptual judgements of motion direction", *Nature* 346 (6280) (1990): 174-77; C. M. Murasugi, C. D. Salzman ve W. T. Newsome, "Microstimulation in visual area MT: Effects of varying pulse amplitute and frequency", *Journal of Neuroscience* 13(4) (1993): 1719-29.

5. Sherlock Kulaklar

1. Piyano telleri: D. R. Griffin ve R. Galambos, "The sensory basis of obstacle avoidance by flying bats", *Journal of Experimental Zoology* 86 (1941): 481-506. Un kurtları: D. R. Griffin, J. H. Friend ve F. A. Webster, "Target discrimination by the echolocation of bats", *Journal of Experimental Zoology* 158 (1965): 155-68.
2. P. M. Hofman, J. G. Van Riswick ve A. J. Opstal, "Relearning sound localization with new ears", *Nature Neuroscience* 1 (1998): 417-21.
3. E. Knudsen ve P. F. Knudsen, "Visuomotor adaptation to displacing prisms by adult and baby barn owls", *Journal of Neuroscience* 9 (1989): 3297-305; J. F.

Bergan, P. Ro, D. Ro ve E. I. Knudsen, "Hunting increases adaptive auditory map plasticity in adult barn owls", *Journal of Neuroscience* 25 (2005): 9816-20.
4. D. S. Pages ve J. M. Groh, "Looking at the ventriloquist: Visual outcome of eye movements calibrates sound localization", *PLOS One* 8 (2013): e72562.
5. G. H. Recanzone, "Rapidly induced auditory plasticity: the ventriloquism aftereffect", *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 95 (1998): 869-75.

6. Harita ve Sayaçlar Eşliğinde Hareket

1. D. A. Robinson, "Eye movements evoked by collicular stimulation in the alert monkey", *Vision Research* 12 (1972): 1795-807.
2. J. M. Groh, "Converting neural signals from place codes to rate codes", *Biological Cybernetics* 85 (2001): 159-65.
3. *A.g.y.*
4. L. A. Jeffress, "A place theory of sound localization", *Journal of Comparative and Physiological Psychology* 41 (1948): 35-39.
5. J. M. Groh, K. A. Kelly ve A. M. Underhill, "A monotonic code for sound azimuth in primate inferior colliculus", *Journal of Cognitive Neuroscience* 15 (2003): 1217-31.
6. J. Lee ve J. M. Groh, "Different stimuli, different spatial codes: a visual map and an auditory rate code for oculomotor space in the primate superior colliculus", *PLOS One* 9 (2014): e85017.

7. Güneş Gözlükleriniz Samanyolunda

1. H. Helmholtz, *Helmholtz's Treatise on Physiological Optics*, 3 cilt (1867; tekrar basım, New York: Dover. 1962).
2. J. K. Stevens, R. C. Emerson, G. L. Gerstein, T. Kallos, G. R. Neufeld, C. W. Nichols ve A. C. Rosenquist, "Paralysis of the wake human: Visual perceptions", *Vision Research* 16 (1976): 93-IN99.
3. D. L. Sparks ve L. E. Mays, "Spatial localization of saccade targets. I. Compensation for stimulation-induced perturbations in eye position", *Journal of Neurophysiology* 49 (1983): 45-63; D. L. Sparks, L. E. Mays ve J. D. Porter, "Eye movements induced by pontine stimulation: Interaction with visually triggered saccades", *Journal of Neurophysiology* 58 (1987): 300-18.
4. J. M. Groh ve D. L. Sparks, "Saccades to somatosensory targets. III. Eye-position-dependent somatosensory activity in primate superior colliculus", *Journal of Neurophysiology* 75 (1996): 439-53.
5. M. F. Jay ve D. L. Sparks, "Auditory receptive fields in primate superior colliculus shift with changes in eye position", *Nature* 309 (1984): 345-47.
6. J. M. Groh, A. S. Trause, A. M. Underhill, K. R. Clark ve S. Inati, "Eye position influences auditory responses in primate inferior colliculus", *Neuron* 29 (2001): 509-18; U. Werner-Reiss, K. A. Kelly, A. S. Trause, A. M. Underhill

ve J. M. Groh, "Eye position effects avtivity in primary auditory cortex of primates", *Current Biology* 13 (2003): 554-62; D. A. Bulkin, J. M. Groh, "Distribution of eye position information in the monkey inferior colliculus", *Journal of Neurophysiology* 107 (2012): 785-95.
7. J. Lee ve J. M. Groh, "Auditory signals evolve from hybrid-to-eye-centered coordinates in the primate superior colliculus", *Journal of Neurophysiology* 108 (2012): 227-42.
8. K. K. Porter, R. R. Metzger ve J. M. Groh, "Representation of eye position in primate inferior colliculus", *Journal of Neurophysiology* 95 (2006): 1826-1842; J. M. Groh ve D. L. Sparks, "Two models for transforming auditory signals from head-centered to eye-centered coordinates", *Biological Cybernetics* 67 (1992): 291-302.

8. Bir Yerlere Gelmek

1. M. Fetter, T. Haslwanter, M. Bork ve J. Dichgans, "New insights into positional alcohol nystagmus using three-dimentional eye-movement analysis", *Annals of Neurology* 45 (1999): 216-23.
2. M. J. Sholl, "The relation between horizontality and rod-and-frame and vestibular navigational performance", *Journal of Experimental Psychology, Learning, Memory, and Cognition* 15 (1989): 110-25.
3. M. Wittlinger, R. Wehner ve H. Wolf, "The ant odometer: Stepping on stilts and stumps", *Science* 312 (2006): 1965-67.
4. C. R. Gallistel, "Animal cognition: The representation of space, time and number", *Annual Review of Psychology* 40 (1989): 155-89.
5. M. Müller ve R. Wehner, "Path integration in desert ants, *Cataglyphis fortis*", *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 85 (1988): 5287-90.

9. Mekân ve Bellek

1. A. Gonshor ve G. M. Jones, "Extreme vestibulo-ocular adaptation induced by prolonged optical reversal of vision", *Journal of Physiology* 256 (1976): 381-414.
2. M. Ito, S. M. Highstein ve J. Fukuda, "Cerebellar inhibition of the vestibulo-ocular reflex in rabbit and cat and its blockage by picrotoxin", *Brain Research* 17 (1970): 524-26.
3. J. C. Marshall ve P. W. Halligan, "Visuo-spacial neglect: A new copying test to assess perceptual parsing", *Journal of Neurology* 240 (1993): 37-40.
4. E. Bisiach ve C. Luzzatti, "Unilateral neglect of representational space", *Cortex* 14 (1978): 129-33.
5. W. B. Scoville ve B. Milner, "Loss of recent memory after bilateral hippocampal lesions", *Journal of Neurology, Neurosurgery, and Psychiatry* 20 (1957): 11.
6. K. S. Lashley, "In search of the engram", *Symposia of the Society for Experimental Biology* 4 (1950): 454-82.

7. J. O'Keefe ve J. Dostrovsky, "The hippocampus as a spatial map: Preliminary evidence from unit activity in the freely moving rat", *Brain Research* 34 (1971): 171-75.
8. J. O'Keefe ve L. Nadel, *The Hippocampus as a Cognitive Map* (Oxford: Clarendon Press, 1978).
9. R. U. Muller ve J. L. Kubie, "The effects of changes in the environment on the spatial firing of hippocampal complex-spike cells", *Journal of Neuroscience* 7 (1987): 1951-68.
10. J. S. Taube, R. U. Muller ve J. B. Ranck Jr., "Head-direction cells recorded from the postsubiculum in freely moving rats. I. Description and quantitative analysis", *Journal of Neuroscience* 10 (1990): 420-35.
11. T. Hafting, M. Fyhn, S. Molden, M.-B. Moser ve E. I. Moser, "Microstructure of a spatial map in the entorhinal cortex", *Nature* 436 (2005): 801-6.
12. N. S. Clayton ve J. R. Krebs, "Hippocampal growth and attrition in birds affected by experience", *Proceedings of the National Academy of Sciences* 91 (1994): 7410-14.

10. Düşünmek Üzerine Düşünmek

1. D. C. Van Essen, "Organization of visual areas in macaque and human cerebral cortex", *The Visual Neurosciences* 1 (2004): 507-21.
2. Konuyla ilgili harika araştırma yazıları için bkz. L. W. Barsalou, "Grounded cognition", *Annual Review of Pschology* 59 (2008): 617-45; B. K. Bergen, *Louder Than Words: The New Science of How the Mind Makes Meaning* (New York: Basic Books, 2012).
3. M. Tucker ve R. Ellis, "On the relations between seen objects and components of potential actions", *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance* 24 (1998): 830.
4. R. N. Shepard ve J. Metzler, "Mental rotation of three dimensional objects", *Science* 171 (1971): 701-3.
5. Örneğin bkz. S. M. Kosslyn, W. L. Thompson, I. J. Kim ve N. M. Alpert, "Topographical representations of mental images in primary visual cortex", *Nature* 378 (1995): 496-98.
6. O. Hauk, I. Johnsrude ve F. Pulvermüller, "Somatotopic representation of action words in human motor and premotor cortex", *Neuron* 41 (2004): 301-7.
7. F. Pulvermüller ve O. Hauk, "Category-specific conceptual processing of color and form in left fronto-temporal cortex", *Cerebral Cortex* 16 (2006): 1193-201.
8. G. Lakoff ve M. Johnson, "Conceptual metaphor in everyday language", *Journal of Philosophy* 77 (1980): 453-86.
9. K. Dunbar, "How scientists think: On-line creativity and conceptual change in science", *Creative Thought: An Investigation of Conceptual Structures and Processes* (1997): 461-93.
10. S. Lacey, R. Stilla ve K. Sathian, "Metaphorically feeling: Comprehending textural metaphors activates somatosensory cortex", *Brain and Language* 120

(2012): 416-21.
11. R. Nunez ve K. Cooperrider, "The tangle of space and time in human cognition", *Trends in Cognitive Sciences* 17 (2013): 220-29.
12. L. Boroditsky ve A. Gaby, "Remembrances of times east: Absolute spatial representations of time in an Australian aboriginal community", *Psychological Science* 21 (2010): 1635-39.
13. R. Q. Quiroga, L. Reddy, G. Kreiman, C. Koch ve I. Fried, "Invariant visual representation by single neurons in the human brain", *Nature* 435 (2005): 1102-7.
14. J. D. Roitman, E. M. Brannon ve M. L. Platt, "Monotonic coding of numerosity in macaque intraparietal area", *PLOS Biology* 5 (2007): e208; A. Nieder, D. J. Freedman ve E. K. Miller, "Representation of the quantity of visual items in the primate prefrontal cortex", *Science* 297 (2002): 1708-11; O. A. Mullette-Gillman, Y. E. Cohen ve J. M. Groh, "Eye-centered, head-centered, and complex coding of visual and auditory targets in the intraparietal sulcus", *Journal of Neurophysiology* 94 (2005): 2331-52.
15. E. Chen, P. Widick ve A. Chatterjee, "Functional-anatomical organization of predicate metaphor processing", *Brain and Language* 107 (2008): 194-202.
16. G. Ganis, J. P. Keenan, S. M. Kosslyn ve A. Pascual-Leone, "Transcranial magnetic stimulation of primary motor cortex affects mental rotation", *Cerebral Cortex* 10 (2000): 175-80.
17. A. K. Fetterman, M. D. Robinson, R. D. Gordon ve A. J. Elliot, "Anger as seeing red: Perceptual sources of evidence", *Social Psychological and Personality Science* 2 (2011): 311-16.
18. J. A. Bargh ve I. Shalev, "The substitutability of physical and social warmth in daily life", *Emotion* 12 (2012): 154-62.

İllüstrasyonlar

Şekil 2.1 J. Zahn, *Oculus Artificialis Teledioptricus Sive Telescopium* (1685), 254.

Şekil 2.2-2.5 © 2014 Jennifer M. Groh.

Şekil 2.6 Athanasius Kircher'in *Ars Magna lucis et umbrae* (1646) başlıklı resminden esinlenilmiştir.

Şekil 2.7-2.11 © 2014 Jennifer M. Groh.

Şekil 2.12 R. Descartes, *La Dioptrique* (1637), 76.

Şekil 2.13-2.14 © 2014 Jennifer M. Groh.

Şekil 2.15 Steoroskop, Wikimedia Commons. Steorograf, Kongre Kütüphanesi'nin izniyle.

Şekil 2.16-2.18 © 2014 Jennifer M. Groh.

Şekil 2.19 © 2013 M. C. Escher Company, Hollanda. Bütün hakları saklıdır.

Şekil 2.20 © 2014 Jennifer M. Groh.

Şekil 3.1-3.5 © 2014 Jennifer M. Groh.

Şekil 3.6 J. R. Lackner, "Some proprioceptive influences on the perceptual representation of body shape and orientation" başlıklı makalesinden, *Brain* 111 (1988): 281-97. Oxford University Press'in izniyle.

Şekil 3.7 J. M. Groh ve D. L. Sparks'ın "Saccades to somatosensory targets. I. Behavioral characteristics" başlıklı makalelerinden, *Journal of Neurophysiology* 75 (1996): 412-27.

Şekil 4.1-4.2 © 2014 Jennifer M. Groh.

Şekil 4.3 D. H. Hubel ve T. N. Wiesel'in "Receptive fields of single neurones in the cat's striate cortex" başlıklı makalelerinden, *Journal of Physiology* 148 (1959): 574-91, Şekil 3.

Şekil 4.4 Chuck Close, *Kendi Portresi*, 2007. Kerry Ryan McFate, fotoğrafçı. © Chuck Close, Pace Gallery'nin izniyle.

Şekil 4.5 Wikimedia Commons.

Şekil 4.6 Hong Zhou, Howard S. Friedman ve Rüdiger von der Heydt'in "Coding of border ownership in monkey visual cortex" başlıklı makalelerinden, *Journal of Neuroscience* 29 (2000): 6594-661, Şekil 2. ABD. Sinirbilim Derneği'nin izniyle.

Şekil 4.7 © 2014 Jennifer M. Groh.

Şekil 4.8 W. Penfield ve T. Rasmussen, *The Celebral Cortex of Man* (New York: Macmillan, 1950) adlı kitaptan alınmıştır. © 1950 Gale, Cangage Learning, Inc. Bu çizim izin alınarak basılmıştır. www.cengage.com/permissions.

Şekil 4.9-4.10 © 2014 Jennifer M. Groh.

Şekil 5.1-5.14 © 2014 Jennifer M. Groh.

Şekil 5.15 Soldaki fotoğraf: Wikimedia Commons. Sağdaki fotoğraf: S. S. Stevens ve E. B. Newman, "The localization of actual sources of sound", *American Journal of Psychology* 48 (1936): 297-306. © 1936 Illinois Üniversitesi Mütevelli Heyeti. Illinois Üniversitesi'nin izniyle yayımlanmıştır.

Şekil 5.16-5.17 © 2014 Jennifer M. Groh.

Şekil 5.18 D. Griffin'in *Echoes of Bats and Men* (Garden City, NY: Doubleday Anchor Books, 1959) başlıklı kitabından alınmıştır, s. 86.

Şekil 5.19 © 2014 Jennifer M. Groh.

Şekil 5.20 P. M. Hofman, J. G. van Riswick ve A. J. van Opstal'ın "Relearning sound localization with new ears" başlıklı makalelerinden alınmıştır, *Nature Neuroscience* 1 (1998): 417-21. Macmillan Publishers Ltd'nin izniyle yayımlanmıştır.

Şekil 5.21-5.22 © 2014 Jennifer M. Groh.

Şekil 6.1-6.6 © 2014 Jennifer M. Groh.

Şekil 6.7 D. A. Robinson'ın "Eye movements evoked by collicular stimulation in the alert monkey" başlıklı makalesinden, *Vision Research* 12 (1972): 1795-807. Elsevier'in izniyle yayımlanmıştır.

Şekil 6.8 J. M. Groh'nun "Converting neural signals from place codes to rate codes" başlıklı makalesinden uyarlanmıştır, *Biological Cybernetics* 85 (2001): 159-65. Springer Science & Business Media'nın izniyle yayımlanmıştır.

Şekil 6.9 J. M. Groh, K. A. Kelly ve A. M. Underhill'in "A monotonic code for sound azimuth in primate inferior colliculus" başlıklı makalelerinden, *Journal of Cognitive Neuroscience* 15 (2003): 1217-31. MIT Press'in izniyle yayımlanmıştır.

Şekil 7.1-7.2 © 2014 Jennifer M. Groh.

Şekil 7.3 A. G. Donald'a ait fotoğraf.

Şekil 7.4 J. M. Groh ve D. L. Sparks'ın "Saccades to somatosensory targets. III. eye-position-dependent somatosensory activity in primate superior colliculus" başlıklı makalelerinden, *Journal of Neurophysiology* 75 (1996): 439-53.

Şekil 7.4-7.5 © 2014 Jennifer M. Groh.

Şekil 8.1 Benoit Denizet-Lewis'e ait fotoğraf, # 119, *The Dish*'teki Pencerenizden Görünen Manzara Yarışması kapsamında yayımlanmıştır, dish.andrewsullivan.com.

Şekil 8.2-8.3 © 2014 Jennifer M. Groh.

Şekil 8.4 J. D. Dickman, D. Huss ve M. Lowe'un "Morphometry of otoconia in the utricle and saccule of developing Japanese quail" başlıklı makalelerinden, *Hearing Research* 188 (2004): 89-103. Elsevier'nin izniyle yayımlanmıştır.

Şekil 8.5 © 2014 Jennifer M. Groh.

Şekil 8.6 M. Müller ve R. Wehner'in "Path integration in desert ants, *Cataglyphis fortis*" başlıklı makalelerinden, *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 85 (1988): 5287-90, Şekil 1.

Şekil 9.1 © 2014 Jennifer M. Groh.

Şekil 9.2 J. C. Marshall ve P. W. Halligan'ın "Visio-spatial neglect: A new copying test to assess perceptual parsing" başlıklı makalelerinden, *Journal of Neurology* 240 (1993): 37-40. Springer Science & Business Media'nın izniyle yayımlanmıştır.

Şekil 9.3-9.4 © 2014 Jennifer M. Groh.

Dizin

akinetopsia, 100
aköz hümor, 39-40
akson, 74-76, 80-81, 88, 94-95
algılamadaki boşluklar, 92
  nesneleri algılama, 83-86
  Ayrıca bkz. sınır sahipliği hassasiyeti; MT (orta temporal bölge)
alıcı alanlar, 42, 69, 76, 78, 81-84, 86-88, 90, 99, 151-53, 156, 167, 191, 202, 205
  Ayrıca bkz. referans çerçeveleri
alkol, 179
analog kod, 145-47, 149-51, 155-58
Aristoteles, 34, 175
astronomi ve optikle ilgili keşifler, 36-42
  Ayrıca bkz. Brahe, Tycho; Kepler, Johannes
ateşleme oranı (nöronlarda), 66

Batlamyus, 110
baziler zar, 114-16, 142
bellek, 112, 174, 182-84, 186-87, 190-91, 193-94, 197, 200
  faaliyet sürekliliği, 185
  hipokampal lezyonlar sonucu hafıza kaybı, 190-91
  mekânsal bellek, 186
  mekânsal bilgiyi sentezlemedeki rolü, 17, 173-74
  mekânsal konumla tetiklenmesi, 192-95
  nöral mekân sistemleriyle çakışma, 182, 183, 187, 192
  sinaptik plastisite, 186-87
  yöntemsel bellek, 185
Bergen, Edgar, 138
beyin haritası, 91, 94, 102, 104, 145
binöral nöronlar, 119-20
Bisiach, Edoardo, 187-89
Born, Richard, 103
Boroditsky, Lera, 201
Brahe, Tycho, 36-38
Brunelleschi, Filippo, 54
Bulkin, David, 170

camera obscura, 34-35, 37
Close, Chuck, 83-84
Conti, Nina, 139

çakışma dedektörü, 156
çift bağ, moleküllerde, 26-27

da Vinci, Leonardo, 20, 42
Demokritos, 20-22
dendrit, 74-76, 80
denge duyusu, 31, 172, 175, 179, 185
  Ayrıca bkz. vestibüler sistem

Denizcilerin Kahvaltısı (Renoir), 106
derinlik algısı, 51, 54, 66
Descartes, René, 20, 41, 43
dijital kod, 145-46, 151-53, 155-56, 203. *Ayrıca bkz.* beyin haritası
dikkat eksikliği, 197-98
DNA, 28
doğrusal perspektif, 54-55
Dostrovsky, Jonathan, 191
duman dedektörü, 127-29, 131-32, 140
Dunham, Jeff, 139
durgun zar potansiyeli, 29-30
düz takip, 97-99

E. coli, 173-74
eğilimli rasgele hareket, 173
ekolokasyon, 134-35
ekstraoküler kaslar, 149
el-Kindî, İshak, 22
elektrik sinyali
  dengede, 177-78
  dokunma, 69, 91
  duyu reseptörleri içinde, 29-32, 42, 61-66, 69, 77, 116, 179
  gecikmesi, 95
  görmede, 29-32, 42, 77
  işitmede, 116
  nöronlar, 29-31, 61-65, 73-76
  vücut konumu, 61-62, 66-68
  Ayrıca bkz. eylem potansiyeli; iyon kanalları; durgun zar potansiyeli
elektriksel sinaps, 95-96
elektriksel uyarı, 101-3, 151-52, 166, 206
elektromanyetik radyasyon, 16, 24-25, 32, 49, 105
Ellis, Rob, 198
endolenf, 179
enzim, 28
epilepsi, 88-89, 101, 190
Escher, M. C., 54-6
evrim, 94, 126, 173, 176, 202
eylem potansiyeli, 62-66, 75, 77, 82, 95-96, 99, 142, 146, 154

fotonlar, 28-29, 49, 106, 147
fotopigment molekülleri, 24-26, 28, 29, 31, 50, 147
fotoreseptörler, 27, 29-32, 40, 42, 49, 78-79, 87, 92, 96, 97, 141, 150, 161
  Ayrıca bkz. kör nokta
Fourier, Joseph, 122-23
fovea, 40, 90, 149-50, 154, 161, 163

gezegenler, 36
glakom, 94
Golgi tendon organı, 58-61, 65, 75, 164
görme siniri, 40, 92
görsel korteks, 81-83, 86, 99, 108, 199
göz ihmali, 187
göz merceği, 40, 42, 81
göz-ışın teorisi, 21-24
göz
  anatomisi, 40
  göz hareketleri, 70-71, 97-98, 103-4, 149-55, 161-69, 171, 184-87
  ışığın kırılması, 39-42
  imge oluşumu, 32-36, 38-42
  omurgalılarda, ışık algılayan bitki ve basit hayvanlarda, 32-33
  ters imge, 35, 42-43
  uzaklık algısı, 44-56
  Ayrıca bkz. fotopigment molekülleri; fotoreseptörler; retina
gözbebeği, 32-33, 35-36, 38-40, 42, 81, 117

halüsinasyon, 206-7
Hauk, Olaf, 199, 201, 213
hayalet uzuv sendromu, 91, 170
hayali kontur algısı, 87-88

Helmholtz, H. L. Ferdinand, 163-65
hesap yitimi, 205
hipermetropluk, 185-86
hipokampus, 190-94, 197, 203
hücre gövdesi, 74-76

ışık
  bitkilerde ve basit hayvanlarda ışık algısı, 31
  elektromanyetik radyasyon olarak ışık, 16, 24-25, 32, 49, 105
  fotopigmentler üzerindeki etkisi, 24-29
  ışık ışınları ve *camera obscura*, 34-35
  ışık ışınları ve imge oluşumu, 33-36
  kırılması, 39-42, 186
  polarize ışık, 50-51
ızgara hücreleri, 193

idrak, 199-200, 202, 205
inferior colliculus, 150, 157, 170
işitme
  başın büyüklüğü ve konumu, 118-21, 127-28, 133-35, 168-69
  göz konumu ve, 169-71
  işitme kaybı, 121, 126, 135, 142
  uzaklık, 132-35
  yankılar ve, 130-35
  zaman, 118-21, 125-6, 135-38, 155-57
  Ayrıca bkz. kulaklar; ses dalgaları
iyon kanalları, 30-31, 63-65, 76-77, 95, 116, 177
  Ayrıca bkz. uyarıcı sinapslar; ketleyici sinapslar

Jay, Martha, 170
Jeffress, Lloyd, 156
Johnson, Mark, 200

Kanizsa üçgeni, 87, 93
karıncalar, 111, 181-82, 193
karışıklık konisi, 121-22, 125-27, 137, 156
karşıtlık, 80, 204
kas iğciği reseptörleri, 58-61, 65-66, 164
kaslar
  eklem konumuyla ilgili çıkarımda bulunan reseptörler, 58-63, 65
  kasılma gücü ve hareket büyüklüğü, 147-48
  titreşimi, 67
  Ayrıca bkz. ekstraoküler kaslar
katalizör, 28, 31
Kepler, Johannes, 20, 22, 33, 36-42
ketleyici sinapslar, 77-80, 96, 158, 171
kırılma, 39-42, 121, 122
kimyasal sinaps, 95
Knudsen, Eric, 140
koklea, 114-17, 141-43, 176
kombinasyonel işlemler, 203-5
konum alanları, 192, 203
konum hücreleri, 111
konum tahmini, 181-82
kornea, 39-40, 42
kör nokta, 40, 93-94
Kubie, John, 192
kulak kepçesi, 125-26
kulak zarı, 114, 117, 125, 155
kulaklar
  içindeki denge organları, 175-79
  işitsel yapısı, 114-16, 122-23
  Ayrıca bkz. koklea; kulak kepçesi
kupula, 177, 179
kürar deneyi, 165-66

Lakoff, George, 200
Lashley, Karl, 191
lateral genikulat nükleus, 81
Le Blanc-Seing (Magritte), 107
Lee, Jungah, 170
Luzzatti, Claudio, 188-89

Magritte, René, 51-52, 54, 107
mekân yöntemi, 194
mekânsal lokasyon, 193
Metzler, Jacqueline, 199
Milner, Brenda, 190
miyopluk, 185-86
Molaison, Henry, 190-91
motor korteks, 89, 200
motor nöronlar, 147-48, 165
MRI ve CT taramaları, 102
MT (orta temporal bölge), 99-101, 103-4, 151, 206
muhakeme, 18-19, 201
müzik, 123, 125, 127, 185, 201

nesne-ışın teorisi, 21-24
nöral yol, 75, 79, 88, 185-86
nöronlar, 17
  bellek, 184, 187
  beyin haritalarındaki, 145-47
  dokunma duyusu, 69-72
  elektrik sinyali, 29-31, 61-65, 74-76
  görsel kortekste, 81-83, 86, 91, 99, 108, 199
  hipokampustaki, 191-92
  kendiliğinden faaliyet, 91, 101
  aktivite ölçümü, 62-63, 66, 152-53
  superior colliculusta, 151-52, 167, 170, 184
  yapıları, 29-31, 74-76, 77-78
  Ayrıca bkz. binöral nöronlar; Golgi tendon organları; tüy hücreleri; iyon kanalları; motor nöronlar; kas iğciği reseptörleri; fotoreseptörler; sinapslar
nörotransmitter, 76-78, 95, 147-48

O'Keefe, John, 191-92
oklüzyon, 51-52, 54, 132
opsin, 28-29
Optik (Kepler), 36, 41
optik akış, 180
otokoniya (kulak taşları), 178
oval pencere, 115

Öklit, 20, 33
öncelik etkisi, 131

Pages, Daniel, 140
pariyetal korteks, 184, 187-89, 197, 205
peçeli baykuşlar, 109, 127, 156
Penfield, Wilder, 88-9, 101-3
Pinokyo yanılsaması, 67
Platon, 20-23
polarizasyon, 49-50
Pompuraawlar, 201
Porter, Kristin Kelly, 170
potasyum iyonları, 30, 62-65, 77
prizma gözlüğü, 68, 140-41
Pulvermüller, Friedemann, 200

radyasyon, 24, 32, 122
Recanzone, Gregg, 141
referans çerçeveleri, 110, 160-62, 168-71, 189, 205
Renoir, Pierre-Auguste, 33, 106
retina, 17, 24, 32, 35, 38, 40, 42, 76-77, 80-81, 92, 108, 146, 150, 155, 161-62, 167-69, 184-85
  düz takip sırasında hareketi, 97-98
  fovea, 90, 161
  görsel haritalar, 73, 76
  kör nokta, 93-94
  optik akış, 179-80
  referans çerçeveleri, 168
  retinal imgenin büyüklüğü ve mesafe, 52-53, 185-86
  stereovizyon ve, 46, 47, 51
  talamusla bağlantısı, 76-77
  ters retinal imgenin yorumlanması, 43-44
retinal ganglion hücreleri, 80, 92, 94

rezonans, 141-42
Rosenquist, Alan, 165
rüyalar, 206

sakkül, 176-78
Sathian, Krish, 201
sayaçlar, beyin kodu olarak, 144, 146-47, 150-51, 154-56, 158, 171, 203
Ayrıca bkz. analog kod, beyinde; beyin haritaları
sekme, 71, 98, 124, 149, 151-54
ses dalgaları, 113-15, 117-30, 133, 136
ses frekansı, 120-24, 127-30, 135, 141-43, 158, 168-69, 201
ses lokalizasyonu
  ayarı, 135-41
  görmeyle ilişkisi, 138-41
  karışıklık konisi, 121-22
  öğrenme, 135-41
  örtüşme, 127-29
  spektral ipuçları, 123-26, 128, 130, 136-37, 158
  uzak mesafede, 132-35
  vantrilokluk, 138-40
  yankılar, 130-35
Shepard, Roger, 199
sınır sahipliği hassasiyeti, 86, 104
sinirbilim, 13, 17, 18, 42, 69, 127, 140, 144, 154, 185, 190-91, 196
sodyum iyonları, 30-31, 62-65, 77
somatosensori korteks, 69, 88-89, 102, 141, 201
Sparks, David, 167, 170
spektral ipuçları, 123-26, 128, 130, 136-37, 158
stereograf, 47
stereoskop, 46-47
stereovizyon, 48, 51, 133
Stevens, John, 165-66
Stratton, George, 43, 67-68, 140, 186
superior colliculus, 150-52, 154, 166-68, 170, 184

Şelale (Escher), 54-55

talamus, 80-82
tek bağ, moleküllerde, 26-27
temellendirilmiş idrak, 198
transkraniyal manyetik stimülasyon, 206
travma sonrası stres bozukluğu, 194
Tucker, Mike, 198
tüy hücreleri, 115-16, 142, 177-79

utrikül, 176-78
uyarıcı sinapslar, 77-79, 96, 171

üç boyutlu filmler, 48, 50

van Opstal, John, 136
vantrilokluk, 138-41
vazo/profil yanılsaması, 85-6
vestibüler sistem, 175, 179, 185-86
vitröz hümör, 39-40
vücut konumu algısı, 61, 68-9, 71-72, 163, 204

Werner-Reiss, Uri, 170

yakınsama, 44-45
yankı, 130-35
yankısız oda, 131
yarasalar, 134, 135
yarım daire kanalları, 176-79
yıldızlar, 24, 36

zihin-beyin ilişkisi, 18-19, 91, 104, 196
zihinsel döndürme deneyleri, 199, 206

metis bilim dizisinde

Genin Yüzyılı Evelyn Fox Keller

Schrödinger'in Kedisinin Peşinde John Gribbin

Bilinç, Kullanım Kılavuzu Adam Zeman

Toplumsal Cinsiyet ve Bilim Üzerine Düşünceler
Evelyn Fox Keller

Bellek Metaforları Douwe Draaisma

İçimizdeki Maymun Frans de Waal

Schrödinger'in Yavru Kedileri John Gribbin

Yaşlandıkça Hayat Neden Çabuk Geçer
Douwe Draaisma

Darwin Sizi Seviyor George Levine

Neden Nasıl Düşünürüz?
Jean-Pierre Changeux, Paul Ricoeur

Neil'in Beyniyle Konuşmalar
George A. Ojemann, William H. Calvin

İlaçla Tedavi Efsanesi Joanna Moncrieff

Alfa ve Omega Charles Seife

Bilgi Ağacı Francisco G. Varela, Humberto R. Maturana

Herkes İçin Evrim David Sloan Wilson

Evren Kullanma Kılavuzu

Dave Goldberg, Jeff Blomquist

Sayı: Bilimin Dili Tobias Dantzig

Yanılıyorsunuz Einstein! Harald Fritzsch

Fizik Aşkına Walter Lewin, Warren Goldstein

Bilim: Dört Bin Yıllık Bir Tarih Patricia Fara

Dilin Aynasından Guy Deutscher

Evrim Serüveni Sedat Ölçer

Gerçek Bir Yanılsama: Bilinç Tevfik Alıcı

Beyin ve İç Dünya Mark Solms, Oliver Turnbull

Bonobo ve Ateist Frans de Waal

Napolyon'un Düğmeleri

Jay Burreson, Penny Le Couteur

Düş Dokumacısı Douwe Draaisma

Kan Revan İçinde Roy Porter

Mekân Yaratmak Jennifer M. Groh

metis bilim

Ray Porter

Kan Revan İçinde

Tıbbın Kısa Tarihi

Çeviren: Gürol Koca

"Hastalık ile hekimler arasında tenin savaş alanında süren savaşın başı ve ortası var ama sonu yok. Bir başka deyişle, tıp tarihi sonu zaferle biten basit bir hikâye olmaktan çok uzak." Böyle diyor Britanyalı tarihçi Porter, tıbbın doğuşunu ve gelişimini ana hatlarıyla anlatan kitabının başında. Ve ardından, on binlerce yıl önce yaşamış avcı-toplayıcı topluluklarından başlayarak insanın hastalıkla mücadelesini aktarıyor.

Modern tıbbın sunduğu incelikli tedavilerin henüz hayal bile edilemediği zamanlarda ne tür hastalıklar ve bunlar için ne gibi çareler vardı? İnsanlar hastalandıklarında veya yaralandıklarında kime gidiyor ve ne tür tedavilerden medet umuyorlardı? Hastalıklara, doktorlara, bedene, tedavilere, hastanelere bakış zaman içinde nasıl değişti? Yirminci yüzyıla kadar en iyi ihtimalle plasebo olarak işe yarayan ilaçlar nasıl oldu da son yüzyılda çok hızlı bir gelişim sürecine girdi? Eskiden sadece doktor ve hastadan oluşan tıp sahnesi, nasıl hastayla doğrudan ilişkisi olmayan sayısız aktörün yer aldığı son derece büyük ve kârlı bir sektör haline geldi?

Şamanlardan ve büyücü hekimlerden modern doktorlara, berber-cerrahlardan uzman cerrahlara, ilkel ampütasyonlardan organ nakillerine, tıp bilimi epey yol kat etmiş gibi görünüyor. Ama Porter'ın da vurguladığı gibi, bu kitap bir zafer hikâyesinden ziyade, tıbbın kimi zaman umut kimi zaman umutsuzluk telkin eden ve hâlâ sürmekte olan ilginç hikâyesini sunuyor.

metis bilim

Douwe Draaisma

Düş Dokumacısı

Çeviren: Türkay Yalnız

Douwe Draaisma'nın kitabı yazma süreci, bir arkadaşının ricası üzerine körlerin düş yaşamı hakkında araştırma yapmasıyla başlamış. "Doğuştan körlerin düşlerinde görsel imgeler bulunmaz, peki ama o zaman ne olur düşlerinde? O boşluk sesler, kokular ve dokunma izlenimleriyle mi doldurulur? Görüntüsüz düşe gene de düş denebilir mi?"

Bu sorular kısa zamanda beraberinde başka soruları da getirmiş elbette: "Düşteki görüntüler gerçekte 'bir tür film gibi' deneyimleniyorsa, neden onca insan düşlerini siyahbeyaz mı, renkli mi gördükleri sorusunu cevaplamayı çok zor bulur? Düş görürken insan düş gördüğünü fark edebilir mi? ... Erotik düşler, en derinlerde yatan cinsel arzuların mı ifadesidir? Kâbuslardaki korku niçin insanın hareket edememesi hissiyle ilintilidir? Uçma düşleri neden her zaman hoş duygular bırakır görende? ... Ve elbette soruların en zoru: Bir anlamı var mıdır düşlerin?"

Kimi zaman hatırlamasak da hemen herkesin düş gördüğünü göz önüne alırsak, hepimizin bir noktada merak etmiş olabileceği sorular bunlar. Draaisma ise her zamanki hoş sohbet üslubuyla, bilimsel bulguları ilginç anekdotlarla harmanlayarak ele alıyor bu ve benzeri konuları.

metis bilim

Mark Solms, Oliver Turnbull

Beyin ve İç Dünya

Öznel Deneyimin Sinirbilimine Giriş

Çeviren: Hakan Atalay

Psikanaliz ile sinirbilim uzun yıllar boyunca birbirine kuşku ve önyargıyla baktı: Psikanalistler insanın iç dünyasının bilimsel bulgulara indirgenemeyecek kadar karmaşık ve incelikli olduğunu söylüyor, sinirbilimciler ise psikanalistlerin kuramlarını temelsiz ve bilimdışı buluyordu. Bu husumetin her iki disipline de büyük zararı dokundu, çünkü sonuçta ikisi de temelde aynı şeyi –insan zihnini– araştırıyordu ve birbirlerinin zaaflarını eleştirmek yerine güçlerini birleştirmeleri çok daha yapıcı bir yaklaşım olurdu. Nitekim kitap, sinirbilimle psikanalizi harmanlayan ve dolayısıyla her ikisinden de daha zengin olan nöropsikanaliz bilimine giriş niteliğini taşıyor. Bu yeni yaklaşım, zihnin işleyişinin hem beyin görüntüleme cihazlarıyla "dıştan" hem de kişisel deneyimler bağlamında "içten" incelenip bulguların birleştirilmesine dayanıyor.

Oliver Sacks'ın kitaba yazdığı önsözde belirttiği gibi, "Beyin ve İç Dünya duygulardan güdülenime, belleğe ve fantazilere, düşler ve varsanılara, sözler ve şeylere, sol ve sağ beyin yarıkürelerinin farklı ve tamamlayıcı işlevlerine, analitik 'konuşma kürü'nün olası temeline, bilinçdışı ve önbilinçli süreçlerin doğasına, öznelliğin temeline, bilince ve benliğe kadar geniş bir yelpazeyi kapsıyor." Yazarlar bu soruları yanıtlarken çok ilginç vakalardan örnekler de sunuyor; böylece, kanıksadığımız beyin işlevlerinin biraz aksaması halinde dünyayı algılayış biçimimizin nasıl değiştiğini bir kez daha hayretle görüyoruz.

metis bilim

Guy Deutscher

Dilin Aynasından

Kelimeler Dünyamızı Nasıl Renklendirir?

Çeviren: Cemal Yardımcı

Dil ile düşünüş tarzı arasındaki bağlantı, dilbilimcileri uzun zamandır meşgul eden bir mesele. Diller zihne birtakım kısıtlamalar getirir mi? Bir kavramın bir dildeki varlığı ya da yokluğu, o dili konuşanların bu kavramı anlama yetisini nasıl etkiler? Her kavram her dilde ifade edilebilir mi? Farklı diller dünyaya dair farklı algılar mı yaratır? Bir toplumun diliyle kültürü arasında nasıl bir ilişki vardır? Bütün diller eşit karmaşıklıkta mıdır?

Dilbilimci Guy Deutscher bu sorulara ikna edici cevaplar sunuyor. Kitap üç temel konuya odaklanıyor: dilin renk algısına, mekân algısına ve dilin cinsiyet ayrımına ilişkin "düşünce alışkanlıklarımız" üzerindeki etkilerine. Bugün dilbilim ve bilişsel bilimler alanında baskın olan görüşün aksine Deutscher, dilin düşünce üzerinde hiç de azımsanmayacak etkileri olduğunu savunuyor ve hayal gücümüzü zorlayacak ölçüde incelikli deney ve araştırmalardan faydalanarak bu savını destekliyor. Kitabın en güzel tarafı ise hem dilbilim tartışmalarının yakın takipçilerine hem de konuya hiç aşina olmayan kişilere hitap edebilmesi; zira yazar dilin hayatımızdaki yerini incelerken asla soyutlamalara başvurmuyor, aksine çok çeşitli dillerden verdiği örneklerle konuyu somut, sürükleyici ve esprili bir şekilde açıklıyor.

metis bilim | 29

Etten kemikten varlıklar olarak hepimiz uzayda bir yer işgal ederiz. Dahası, farkında olsak da olmasak da, içinde bulunduğumuz mekânı birçok yönüyle zihnimize kaydeder ve hareketlerimizi ona göre ayarlarız. Nesnelerin yerini belirleme, sınırlarını algılayarak onları birbirinden ayırt etme, mesafe ölçme, kendi konumumuzun farkına varma — bunlar hep mekân algımızla ilgili vazgeçilmez becerilerdir. Peki beyin bunları nasıl yapar?

Jennifer Groh, beynin mekân algısıyla ilgili mekanizmalarının ne kadar incelikli olduğunu, en basit bir tespitin bile mikroskobik ölçekte ne kadar karmaşık faaliyetler içerdiğini gözler önüne seriyor. Ayrıca mekân algısının beynin çok farklı işlevleriyle nasıl iç içe geçtiğini; görme, işitme ve dokunma duyularının yanı sıra belleğin ve farkındalığın mekân algısıyla ilişkisini ilginç ve yaratıcı deneyler aracılığıyla açıklıyor.

"Bana göre bilimdeki en ilgi çekici sorun, nöral ateşleme örüntülerinin düşünceyi nasıl oluşturduğu sorunudur. Düşünme, tahayyül etme, muhakeme, endişelenme, arzulama, planlama ve karar vermeden oluşan o zengin zihinsel hayatımızın, beyin içindeki mikroskobik hücrelerin oluşturduğu elektrik sinyallerinde nasıl vücut bulduğunu hep öğrenmek istemişimdir. Bu kitap bunun cevabını vermiyor ama güçlü bir analoji sunuyor: Beynin ölçebildiğimiz şeylerle (duyusal uyaranlar gibi) ilgili bilgiyi nasıl işlediğini kavrayabilirsek, ölçemediğimiz şeyleri (fikirler gibi) nasıl işlediğini anlayabiliriz belki."

Metis Bilim
ISBN-13: 978-605-316-050-2

9 786053 160502

Metis Yayınları
www.metiskitap.com