KAOS



JAMES GLEICK

TÜBİTAK

KAOS
Yeni Bir Bilim Teorisi

James Gleick

TÜBİTAK
POPÜLER BİLİM KİTAPLARI

TÜBİTAK Popüler Bilim Kitapları 15

Kaos - Chaos
James Gleick
Çeviri: Fikret Üçcan

© James Gleick, 1987
© Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu, 1995
TÜBİTAK Popüler Bilim Kitaplarının Seçimi ve Değerlendirilmesi
TÜBİTAK Yayın Komisyonu Tarafından Yapılmaktadır

ISBN 975 - 403 - 029 - 4

İlk basımı Mayıs 1995'te yapılan
Kaos
bugüne kadar 17.500 adet basılmıştır.

8. Basım Mart 2000 (2500 adet)

Yayın Yönetmeni: Sedat Sezgen
Teknik Yönetmen: Duran Akca
Sanat Yönetmeni: Ödül Evren Töngür
Uygulama: İnci Karakul

TÜBİTAK
Atatürk Bulvarı No:221 06100 Kavaklıdere/Ankara
Tel: (312) 427 33 21 Faks: (312) 427 13 36
e-posta: bteknik@tubitak.gov.tr
İnternet: www.biltek.tubitak.gov.tr

Atılım Kağıt Ürünleri ve Basım San. A.Ş. - İstanbul

Kaos

YENİ BİR BİLİM TEORİSİ

James Gleick

ÇEVİRİ
Fikret Üçcan

TÜBİTAK POPÜLER BİLİM KİTAPLARI

müzik beşeriydi,
statik ise doğaldı ...
JOHN UPDIKE

İçindekiler

İlksöz *I*

Kelebek Etkisi *1*
Edward Lorenz ve Lorenz'in meteoroloji oyuncağı. Bilgisayar şaşıyor. Uzun süreli hava durumu tahminlerinin bahtı kara encamı. Düzen maske takıp gelişigüzellik olmuş. Nonlineerlikten oluşmuş bir dünya. "Biz ipin ucunu tamamen kaçırdık."

Devrim *31*
Devrim ufukta görünüyor. Sarkaç saatler, uzay topları ve çocuk parklarındaki salıncaklar. At nalının icat edilişi. Bir sırrın çözülüşü: Jüpiter'deki Kırmızı Leke.

Hayatın İniş ve Çıkışları *63*
Yabani popülasyonları modellemek. Nonlineer bilim, "Filden gayri hayvanların incelenmesi." Çatal türü dallanmalar ve Spree nehrinde gemi turu. Bir kaos filmi ve kutsal bir çağrı.

Doğanın Bir Geometrisi *93*
Pamuk fiyatları üzerine bir keşif. Bourbaki mültecisi. İletim hataları ve tırtıklı sahil şeritleri. Yeni boyutlar. Fraktal geometrinin canavarları. Şizosferdeki sarsıntılar. Bulutlardan kan damarlarına. Bilimin çöp tenekeleri. "Dünyayı bir kum tanesinin içinde görebilmek."

Garip Çekiciler *141*
Çözümü Tanrı'dan sorulacak bir problem. Laboratuvardaki geçişler. Dönen silindirler ve bir dönüş noktası. David Ruelle'in türbülans hakkındaki görüşü. Faz uzayındaki sarmallar. Milföy ve sosis. Bir astronomun dönüşümleri. "Havai fişekler mi, yoksa galaksiler mi?"

Evrensellik 183

Los Alamos'ta yeni bir başlangıç. Renormalizasyon grubu. Kod çözen renk. Sayısal deneylerin artışı. Mitchell Feigenbaum'un müthiş buluşu. Evrensel bir teori. Red yazıları. Como'daki buluşma. Bulutlar ve tablolar.

Deneysel Fizikçi 223

Küçük bir kutudaki Helyum. "Katının katı olmayan kabarması." Doğadaki akış ve form. Albert Libchaber'in hassas zaferi. Deney teoriye katılıyor. Bir boyuttan birçok boyuta.

Kaostan Görüntüler 253

Kompleks düzlem. Newton yönteminde sürpriz. Mandelbrot kümesi: Filizleri ve sarmaşıkları. Sanat ve ticaretin bilimle karşılaşması. Fraktal havza sınırları. Kaos oyunu.

Dinamik Sistemler Kulübü 287

Santa Cruz'da 1960'lı yıllar. Analog bilgisayar. Buna bilim denebilir miydi? "Uzak görüşlü bir vizyon." Öngörülemezin ölçülmesi. Enformasyon teorisi. Mikro ölçekten makro ölçeğe. Damlayan musluk. Odyovizüel araçlar. Bir çağ kapanıyor.

İçimizdeki Ritimler 327

Modellere ilişkin bir yanlış anlama. Bedenin kompleksliği. Dinamik kalp. Biyolojik saatin tekrar kuruluşu. Öldürücü aritmi. Tavuk embriyonları ve anormal kalp atışları. Sağlıkta kaos.

Kaos ve Ötesi 357

Yeni görüşler, yeni tanımlar. İkinci Yasa, kar tanesi bulmacası ve hileli zar. Fırsat ve mecburiyet.

Notlar - Yararlanılan Kaynaklar ve Ek Okuma Listesi 377

Teşekkürler 399

Dizin 401

İlksöz

New Mexico Eyaletinde Los Alamos[1] adlı küçük bir şehrin polisi, 1974 yılında, her gece şehrin kenar sokaklarında ağzından eksik etmediği sigarasının kırmızı ateşini dalgalandırarak esrarengiz bir şekilde dolaştığı bildirilen bir adam yüzünden bir süre tedirgin olmuştu. Bu adam, ovanın latif havasını yıkayan ay ışığı altında, nereye gittiği belli olmadan saatler boyunca yürüyordu. Rahatsızlık duyanlar arasında polisten başkaları da vardı. Ulusal Laboratuvardaki bazı fizikçiler aralarına en son katılan bu meslektaşlarının bir günü yirmi altı saate çıkaran bir programı uygulamayı denediğini, yani onun uyanık olduğu saatlerle kendilerinin uyanık olduğu saatlerin bir türlü birbirine denk düşmediğini öğrenmişlerdi. Durum öylesine garipti ki, Teorik Çalışmalar Bölümündekilerin bile tuhafına gidiyordu.

J. Robert Oppenheimer'in, atom bombası projesi için New Mexico'nun gözlerden ırak bu köşesini seçtiği günden bu yana geçen otuz yıl içinde, Los Alamos Ulusal Laboratuvarı kuş uçmaz kervan geçmez ovanın bir ucundan öbür ucuna yayılmış, parçacık hızlandırıcıları, gazlı lazerler ve kimya tesisleri ile binlerce bilim adamını, idareci ve teknisyeni bir araya getirdiği gibi dünyanın en muazzam süper bilgisayar birikimlerinden biri de burada oluşmuştu. Bilim adamları arasında buranın en eskisi olanlardan bazıları 1940'lı yıllarda, kayalık arazinin üzerinde mantar gibi bir anda bitiveren ahşap binaları hatırlıyor; buna karşılık, Los Alamos'ta kadife pantalon ve iş gömlekleri giyip ortalıkta adeta kolejli havasında gezen genç kadın ve erkek personelin birçoğu da, atom bombasını ilk yapanların olsa olsa hayaletler olacağını düşünüyordu. Laboratuvarda Teorik Çalışmalar Bölümü olarak bilinen yer en saf şekliyle düşüncenin üretildiği me-

kândı; buraya T bölümü denirdi, bilgisayar bölümünün adı C bölümü, silahlarınki ise X bölümüydü. T bölümünde yüzden fazla fizikçi ile matematikçi çalışıyordu, bunlar çok iyi ücret alırdı; üstelik öğretim ve yayın yapma mecburiyeti gibi akademik yükümlülükleri de bulunmamaktaydı. Bu bilim adamları hayattaki en büyük tecrübelerini dehanın ve orijinal düşüncelerin yolundan geçerek edinmişlerdi. Bu bakımdan, her gördükleri şey karşısında öyle kolay kolay hayrete düşecek cinsten insanlar değillerdi.

Ne var ki, Mitchell Feigenbaum alışılmış kimselere pek benzemiyordu. Yayınlanmış tek bir makalesi vardı, üzerinde çalıştığı konuların da herhangi bir özellik arzettiği söylenemezdi. Bakımsız bir aslan yelesine benzeyen saçları, geniş alnının üzerinden geriye doğru dökülerek kendisine romantik çağ Alman bestekârlarının heykellerinde görülen bir hava veriyordu. Keskin bakışlarında hırslı bir ifade okunurdu. Kendine özgü tarzıyla hızlı hızlı konuşurken, kendisi doğma büyüme Brooklyn'li* olmasına rağmen, orta Avrupalıların konuşurken yaptıkları gibi, kelimelerin ilk hecelerini yutardı. Çalıştığı zaman, kendini işine tamamen kaptırırdı. Çalışamadığı zamanlarda ise gündüz gece demez, hem dolaşır hem düşüncelerine dalardı, bunun için de en iyi zaman geceydi. Günün yirmi dört saatten ibaret olması ona yetmiyordu. Bununla birlikte, her iki üç günde bir yaptığı gibi, güneşin battığı saatte yataktan kalkıp güne başlamaya artık dayanamayacağına kanaat getirdikten sonra, günlük program olarak kimseye benzemeyen uyku ve çalışma saatleri uygulaması da sona erdi.

Daha yirmi dokuz yaşında iken bilginler arasında temayüz etmiş, bilim adamlarının, çözülmesinde özellikle zorluk çekilen bir problemle karşılaştıklarında, kendisini bulabildikleri takdirde, fikrine başvurdukları bir danışman haline gelmişti. Bir akşam işe, tam laboratuvar müdürü Harold Agnew çıkarken geldi. Ağırbaşlı ve saygın bir kişilik sahibi olan Agnew, Oppenheimer'ın ilk yetiştirdiği öğrencilerden

*New York'un bir mahallesi (ç.n.)

biriydi. Enola Gay'in* refakatçisi olarak teknik aletler taşıyan bir uçakla Hiroşima'nın üzerinde uçmuş ve laboratuvardan çıkan ilk ürünün atılışının fotoğraflarını çekmişti.

Agnew, Feigenbaum'a, "Anlaşılan siz oldukça akıllıymışsınız,"[2] dedi. "Madem ki bu kadar akıllısınız, neden lazer füzyonunun çözümü konusuna el atmıyorsunuz?"

Feigenbaum'un arkadaşları bile, kendiliğinden işe kalkışıp ortaya bir şey çıkaracak mı diye merak edip durmaktaydılar. Sordukları sorulara hiçbir hazırlığı olmadan dahi akıllara durgunluk verecek şekilde cevaplar vermeye bayılıyor; kendi araştırmalarını karşılığında bir yarar sağlayabilecek herhangi bir probleme hasretmeye hiç de taraftar görünmüyordu. Sıvılardaki ve gazlardaki türbülans konusunu düşünüyordu. Zaman konusunu düşünüyordu - zaman devamlı bir hareketle ileri doğru mu kayıyor, yoksa kozmik bir sinema filmi karelerinin oluşturduğu bölümler gibi tek tek sıçramalar halinde mi ilerliyordu? Fizikçilerin nazarında, yer değiştiren bir kuantum kaleydoskobu olarak bilinen evrende insan gözünün tutarlı renkleri ve şekilleri görüp ayırt edebilme yeteneği konusunu düşünüyordu. Uçak pencerelerinden (bilim adamı sıfatıyla bir ayrıcalık olarak kullandığı seyahat imkânlarını istismar ettiği gerekçesiyle bu hakkın resmen elinden alındığı 1975 yılına kadar) bakıp seyrettiği ya da laboratuvarın yukarısındaki yürüyüş yollarında gezerken gördüğü bulutları düşünüyordu.

Batı bölgesinin dağlık yörelerindeki şehirlerde bulutlara bakarsanız, bunların Doğu bölgesinde havaya yayılan sis perdesinin yerlere çökmüş puslu şekilsizliğiyle hemen hiçbir benzerliği olmadığını görürsünüz. Los Alamos'ta, büyük bir volkanik çukurun rüzgâr tutmayan bir yönünde, bulutlar hem gökyüzüne doğal, gelişigüzel bir oluşum içinde yayılır, hem de gelişigüzel olmayan bir oluşum olarak ya aynı kalıptan çıkmış sivri çıkıntılar halinde dizilir ya da sürülürken yarılan toprağın önce yukarı doğru kabarıp sonra ucundan tekrar aşağı kıvrılması gibi, beynin kıvrımlarına benzeyen

*6 Ağustos 1945'te Japonya'daki Hiroşima şehrine 20.000 TNT gücündeki ilk atom bombasını atan ABD uçağı. (ç.n.)

şekiller meydana getirir. Fırtınalı bir günün öğleden sonrasında, ağırlaşarak yaklaşan elektrik yükünün havadaki titreşimleri ile gökyüzündeki pırıltıların birbirleriyle kaynaştığı bir sırada, daha elli kilometre* öteden görülen bulutlardan süzülüp yansıyan ışığın yarattığı manzara, fizikçiler için, ancak ârif olanın anlayabileceği bir ders verilircesine sahnelenmiş bir gösteriye dönüşünceye kadar sürer. Aslında doğanın hem muğlak, hem ayrıntılı, hem karmaşık bir yapıya sahip hem de önceden kestirilemeyen bir yüzü olan bulutlar, fizikteki büyük akımlar tarafından hep ihmal edilmişti. Feigenbaum bu konuları da, kendi kendine sessizce düşünüyor, ancak, bunlardan verimli bir sonuca varmıyordu.

Bir fizikçinin gözünde, lazer füzyonu oluşturmak akıl ve mantığın kabul etmeyeceği bir mesele değildi; küçük parçacıkların hızla dönmesinin, renklerinin ve tatlarının sırrını çözmek akıl ve mantığın kabul etmeyeceği bir mesele değildi; evrenin oluşunun yaşını tespit etmek akıl ve mantığın kabul edemeyeceği bir mesele değildi. Bulutları anlamak ise meteorologların çözmesi gereken bir meseleydi. Diğer fizikçiler gibi, Feigenbaum'un da bu meseleleri sıraya dizmek için kullandığı cinaslı bir argo dili vardı. *Bunun böyle olduğu besbelli*, dediği zaman, doğru dürüst bilgiye sahip her fizikçinin duruma uygun gözlem ve hesaplamaları yaptıktan sonra anlayabileceği bir sonucu ifade etmiş olurdu. *Pek o kadar açık değil*, dediği zaman ise üzerinde ciddi ciddi çalışılması gereken, ucunda Nobel ödülleri görünen bir işi kastederdi. Fizikçiler, en zor problemlerden bahsederken *zorlu* gibi sözler kullanırlardı; bunlar öyle problemlerdi ki, bu konularda evrenin bağrından sır vermeye yanaşmasını sağlamak için, uzun uzadıya gözlemler yapmak, incelemek, araştırmak gerekiyordu. 1974 yılında, meslektaşlarından pek azının bilmesine rağmen, Feigenbaum'un üzerinde çalıştığı konu bu zorlu meselelerden biriydi: Kaos.

Kaosun başladığı noktada klasik bilim durur. Fizik bilimi var olduğundan beri tabiatın yasaları araştırılıp sorgulanmış, ancak, fizikçiler atmosferde, çalkantılı denizlerde, ya-

*İngilizce metinde otuz mil. (ç.n.)

ban popülasyonlarının dalgalanmalarında, kalp ve beynin titreşimlerinde var olan düzensizlik konusuna gelip dayandıklarında dünyayı bu konuların cahili olmaktan kurtaramamışlardır. Tabiatın kuraldışı olan yüzü, devamsızlık ve intizamsızlık gösteren yüzü - hepsi de, bilim için birer bilmece, hatta daha kötüsü birer hilkat garibesi olarak kalmıştır.

Ne var ki, 1970'li yıllarda gerek Amerika Birleşik Devletleri'nde gerek Avrupa'daki birkaç bilim adamı düzensizlik konusuna el atmaya başladı. Matematikçiler, fizikçiler, biyologlar, kimyacılar olarak hepsi de kuraldışılığın çeşitli türleri arasında bağlantılar bulmak peşindeydi. Fizyologlar insan kalbinde oluşan ve izah edilemeyen ani ölümlerin belli başlı nedeni olan kaosta hayret verici bir düzen bulunduğunu tespit ettiler. Ekoloji uzmanları güve popülasyonlarının çoğalmalarını ve yokoluşlarını araştırdılar. Ekonomistler eski stok maliyeti verilerini inceleyip yeni bir analiz yöntemi denediler. Sonuçta ortaya çıkan bakış açısı, araştırıcıları, bulutların aldığı şekillere, şimşeğin izlediği yollara, kan damarlarının mikroskopik düzeylerde oluşturduğu ağlara, yıldızların galaksiler halinde kümelenmesine, yani doğrudan doğruya tabiata yöneltiyordu.

Mitchell Feigenbaum Los Alamos'ta koas konusunu düşünmeye başladığı zamanlarda dünyanın çeşitli yerlerinde, aynı konuya ilgi gösteren birbirinden habersiz birkaç bilim adamı daha vardı. Kaliforniya'daki Berkeley Üniversitesinde bir matematikçinin kurduğu küçük bir grup çalışmalarını tamamen "dinamik sistemler" konusunda yeni bir yaklaşım oluşturmaya vakfetmişti. Princeton Üniversitesinde popülasyonlar biyolojisiyle uğraşan bir araştırıcı, bazı basit modellerin bünyesinde insana şaşkınlık verecek kadar karmaşık davranış biçimleri saklı olduğu gerçeğine bütün bilim adamlarının eğilmelerini sağlamak için, kendi duyduğu heyecanı da ortaya koyan bir çağrı yayınlamak üzereydi. IBM'de çalışan bir geometrici tabiattaki düzeni kuran ilkelerden biri olarak düşündüğü - dikenli, dolaşmış, küçük parçalara ayrılmış, bükülmüş, kırılıp dağılmış gibi - birtakım şekilleri tanımlayabilmek için yeni bir kelime arıyordu. Bir

Fransız matematiksel fizikçisinin ileri sürdüğü, doktrinde tartışmalı bir iddiaya göre sıvılardaki türbülansın, tuhaf, sonsuz derecede dolaşık soyut bir nesne ile ilişkisi vardı ki, kendisi bunu garip bir çekici diye adlandırıyordu.

On yıl kadar sonra, kaos kelimesi, bilimsel düzenin dokusunu yeniden şekillendirmeye yönelik hızlı gelişmeyi kısaca tanımlamak için kullanılan bir kavram haline geldi. Kaos üzerine konferanslar, kaos dergileri ortalığı sardı. Savunma Bakanlığı, Merkezi Haberalma Teşkilâtı (CIA) ve Enerji Bakanlığı için yapılacak araştırmalara ödenek tahsis edilmesini öngören kamu programlarının[3] yöneticileri kaos alanındaki araştırmalara daha büyük kaynaklar tahsis edip bu araştırmaların finansmanını yönetmek üzere bürokrasi içinde özel birimler oluşturdular. Bütün büyük üniversitelerle bütün büyük kurumların araştırma merkezlerindeki teorisyenler birinci önceliği kaosa verip kendi uzmanlık alanlarını ikinci plana attılar. Los Alamos'taki The Center for Nonlinear Studies (Nonlineer Araştırmalar Merkezi) gerek kaos gerekse kaosla ilgili meselelerle ilgili olarak yapılan çalışmalarda koordinasyon sağlamak amacıyla kuruldu; ABD'nin her yerinde, üniversitelerde buna benzer enstitüler türedi.

Kaos, karmaşıklığın temelinde yatan muazzam ve hassas yapıyı yakalayabilmek için hem bilgisayar kullanımında özel bazı teknikler hem de birtakım özel grafik resim ve çizgi türleri icat etmiştir. Yeni bilim kendi dilini de üreterek *fraktallar ve bifürkasyonlar (dallanmalar), intermitensiler ve periyodiklikler, katlanmış peçete difeomorfizmleri ve erişte haritaları* gibi kendine özgü terimler kullanmaya başlamıştır. Nasıl klasik fizikte maddenin yeni elemanları kuark ve glüonlar ise bunlar da hareketin yeni elemanlarıdır.[4] Bazı fizikçilere göre, kaos bir durumun bilimi değil bir sürecin bilimi[5]; bir varoluşun bilimi değil bir oluşumun bilimidir.

Şimdi bilim aramaya başladıktan sonra, kaos adeta her yerde ortaya çıkmaktadır. Sigara dumanı havaya birtakım düzensiz helezonlar şeklinde dönerek yükselir. Bayrak rüzgârda bir o yana bir bu yana çırpınarak dalgalanır. Musluktan damlayan su önce muntazam aralıklarla düşerken son-

raları düzeni bozulur. Havanın davranışında, havadaki bir uçağın davranışında, otoyolda birbirinin peşi sıra giden arabaların davranışında,[6] yeraltındaki boruların içinde akan petrolun davranışında kaos meydana çıkar. İçinde bulunulan ortam ne olursa olsun, davranış biçimi yeni keşfedilmiş bulunan bu yasalara uyar. Bu olgunun bilincine varılması ile, şirket yöneticilerinin sigorta konusunda karar verme şekli, astronomların güneş sistemine bakış tarzı, siyaset teoricilerinin silâhlı çatışmalara yol açan bunalımlardan söz ediş biçimi değişmeye başlamıştır.[7]

Kaos bilim dallarını birbirinden ayıran duvarları da aşıp geçer. Kendisi de sistemlerin global doğasının bilimi olduğundan dolayı, geçmişte birbirine çok uzak alanlarda olan düşünürleri bir araya getirmiştir. Deniz Kuvvetlerinde, bilimsel araştırmaların ödeneklerini tahsis etmekle görevli bir subay, matematikçilerden, biyologlardan, fizikçilerden ve hekimlerden oluşan bir dinleyici kitlesine hitap ettiği sırada, "On beş yıl önce, bilim gittikçe artan düzeyde bir ihtisaslaşmaya doğru yol almaktaydı,"[8] diyordu. "Bu ihtisaslaşmanın kaos yüzünden ters yüz olduğu artık açıkça meydana çıkmıştır." Kaos bilimde kabul edilmiş çalışma yöntemlerini sorgulayan meseleler yaratır. Karmaşıklığın evrensel davranış biçimi hakkında ortaya güçlü iddialar atar. Kaosun ilk teoricilerinin, bu bilim dalını rayına ilk oturtan bilim adamlarının bazı ortak duyarlı tarafları vardı. Şekilleri bulup çıkarmakta çok mahirdiler; özellikle de aynı anda farklı ölçeklerde görünen şekiller gözlerinden kaçmazdı. Tesadüfe dayalı ve karmaşık olan her şeye, çentikli kenarlara ve ani sıçramalara bayılırlardı. Kaos inananları - kendilerinden bazen böyle, bazen kaos "dönmeleri" hatta kaos "vaizleri" diye bahsettikleri de olur - determinizm ve serbest irade hakkında, evrim hakkında, bilinçli zekânın niteliği hakkında spekülasyonlarda bulunurlar. Bilimde redüksiyonizm* doğrultusunda yol alan bir trendi, yani sistemleri oluşturan kuarklar,

*Kompleks bir fikir ya da kompleks bir sistemin, içindeki basit bölümleri veya komponentleri analiz etmek suretiyle tamamen anlaşılabileceğini öneren görüş ya da yöntem. (ç.n.)

kromozomlar ya da nöronlar gibi unsurları ele alarak analiz etme yönelimini tersine çevirdiklerini düşünürler. Bütünün arayışı içinde olduklarına inanırlar.

Yeni bilimin en hararetli taraftarları hızlarını alamayıp işi, yirminci yüzyılda bilimin sadece üç şeyle, relativite, kuantum mekaniği ve kaosla hatırlanacağını söylemeye kadar vardırırlar.[9] Bunların iddialarına bakılırsa kaos, fiziksel bilimlerde içinde yaşadığımız asrın üçüncü büyük devrimi haline gelmiştir.[10] İlk iki devrim gibi, kaos da Newton'un fizik kuramıyla ipleri koparmıştır. Bir fizikçinin dediği gibi: "Relativite mutlak uzay ve zamana dair Newtoncu yanılgıya son vermişti[11]; kuantum teorisi denetlenebilir bir ölçüm sürecine dair Newtoncu rüyaya son verdi; kaos da Laplace'ın determinist yaklaşım çerçevesindeki olguların önceden bilinebileceği hakkındaki fantezisine son vermektedir." Bu üçü arasında sadece kaostaki devrim, görebildiğimiz ve dokunabildiğimiz evren bakımından, insan ölçeğindeki nesneler bakımından geçerlidir. Her gün yaşadığımız deneyimler ve dünyanın gerçek resimleri, araştırmanın meşru hedefleri haline gelmiştir. Açıkça ifade edilmemekle birlikte, teorik fiziğin insanın dünyayı algılayan sezgilerinden kopup uzaklaştığı şeklinde uzun zamandan beri devam edegelen bir düşünce mevcuttur. Böylesine bir düşünce nasıl bir inkâra dönüşecektir; üretken bir sapkınlık mı olacaktır, yoksa sadece düpedüz bir sapkınlık mı, bunu kimse bilemez. Ama, fiziğin bir köşede sıkışıp kalmaya doğru yol aldığı düşüncesine kapılanlar, şimdi kaosu bir çıkış yolu olarak görmektedir.

Kaos konusundaki araştırmalar bizzat fiziğin içindeki büyük araştırma akımlarının dışında ortaya çıktı. Yirminci yüzyılın hemen hemen tamamında parçacık fiziği bu akımların konusu olarak görülmüş; maddeyi oluşturan blokların gittikçe daha yüksek enerji düzeylerinde, gittikçe daha küçük ölçeklerde, gittikçe daha kısa zaman aralıklarında araştırılması konu edilmiştir. Parçacık fiziğinden tabiatın temel kuvvetleri ve evrenin kökeni hakkında teoriler türetilmiştir. Oysa genç fizikçilerden bazıları, bilimler arasındaki en prestijli bilim dalının bu yönde ilerlemesinden hiç memnun ol-

madılar. İlerleme hızı ağır aksak bir hal almaya, yeni partiküllerin adlandırılması saçma sapan olmaya, teorinin yapısı da arap saçına dönmeye başladı. Kaosun ortaya çıkmasıyla birlikte, genç bilim adamları, bunda fiziğin bütününü kapsayan bir değişim olgusunun ilk işaretlerini gördüklerine inandılar. Bu gençlere göre, fizikteki yüksek enerji parçacıkları ve kuantum mekaniğine ait göz kamaştıran kavram genellemeleri artık yetiyordu.

Newton'un Cambridge Üniversitesindeki kürsüsünün şimdiki sahibi kozmolog[12] Stephen Hawking 1980'de verdiği "Teorik Fiziğin Sonuna mı Yaklaşıyoruz?" konulu bir konferansta kendi bilim dalının bir muhasebesini yaparken, fizikçilerin büyük çoğunluğunun düşüncelerine şu şekilde tercüman oluyordu:

"Günlük hayatta yaşadığımız bütün olguları yöneten fizik kanunlarını zaten biliyoruz . . . . Teorik fizikte öyle bir noktaya gelmiş bulunuyoruz ki, bugün, sonuçlarını önceden kestirmemiz mümkün olmayan bir deneyi gerçekleştirmek için gerek duyduğumuz muazzam makineler ve dünya kadar para, ulaştığımız bu yer karşılığında ödediğimiz bedeli teşkil etmektedir."

Oysa Hawking'in anlayışına göre, tabiatın yasaları parçacık fiziği terimleriyle açıklanmaya çalışıldığında, bu yasaların en sade ve basit sistemler dışındaki sistemlerde nasıl uygulanacağı sorusu her zaman yanıtsız kalıyordu. Bir hızlandırıcının içinde yarışıp duran iki parçacığın, sonunda girdikleri kabarcık odasında çarpışacağını tahmin etmek başka şeydir. Bildiğimiz basit bir küvetin içinde suyun oluşturacağı girdapları, dünyayı çevreleyen havanın hareketlerini ya da insan beyninin faaliyetini önceden kestirmek ise bambaşka bir şeydir.

Hawking fiziği, hem Nobel ödülleri topladığı ve yapılacak deneyler için büyük ödenekler sağladığı için etkinliğini kanıtlamış hem de devrim niteliğinde olduğu birçok kimse tarafından ifade edilmiştir. Zaman zaman bilimin şahı olan Büyük Birleşik Teoriye yaklaştığı ya da "herşeyi açıklayan teori" olmasına pek az kaldığı hissini vermiştir. Fizik, enerji

ve maddenin tarih içindeki gelişimini evrenin gözünü ilk açtığı ana kadar izlemeyi mümkün kılabilmişti. Peki, savaş sonrası dönemin parçacık fiziği bir devrim sayılır mıydı? Yoksa Einstein'ın, Bohr'un veya izafiyet ve kuantum mekaniğinin diğer atalarının çizdiği yolda yeşeren bir fidandan başka bir şey değil miydi? Şüphesiz ki, fiziğin atom bombasından transistöre kadar uzanan bir yelpaze içinde gerçekleştirdiği eserler yirminci yüzyıla yepyeni bir çehre kazandırmış bulunmaktadır. Ancak, parçacık fiziğinin kapsamı daralmış gibi görünmektedir. Üstelik yepyeni bir teorik düşünceyi ortaya atan bu bilim dalının, konunun uzmanı olmayanların dünyayı kavrayış biçimini de etkileyip değiştirdiği günden bu yana iki nesil gelip geçmiştir.

Hawking'in tanımladığı şekliyle fiziğin, doğaya ilişkin en temel problemlerden bazılarının çözümünü gösteremeden misyonunu tamamlayıp gitmesi mümkündür. Hayat nasıl başlar? Türbülans nedir? Hepsinden öteye, entropinin hüküm sürdüğü bir evren, dur durak bilmeden gittikçe daha büyük bir düzensizlik doğrultusunda yol alırken, düzen nasıl meydana gelir? Diğer taraftan, günlük yaşamda her an karşılaştığımız sıvılar, mekanik sistemler gibi nesneler hayatımızın o kadar asli ve alelâde unsurları arasında gibi görünmekteydi ki, fizikçiler doğal olarak, bunların çok iyi anlaşılmış bulunduğunu varsaymak eğiliminde olmuşlardı. Oysa durum öyle değildi.

Kaosta meydana gelen devrim kendi mecrasında hızla ilerlerken, en iyi fizikçiler de kendilerini pek fazla sıkmadan ilgi odaklarını beşeri ölçekteki fenomenlere çevirmişlerdir. Sadece galaksileri değil bulutları da incelemektedirler. Bilgisayarlarla yaptıkları yararlı araştırmalarda sadece Cray'leri değil Macintosh'ları da kullanmaktadırlar. En itibarlı dergilerde, kuantum fiziğiyle ilgili makalelerin yanı sıra masa üstünde zıplayan bir topun acayip dinamiğiyle ilgili makaleler de yayınlanmaktadır. Günümüzde, olaylar hakkında tahmin yürütülmeye kalkışıldığında, en basit sistemlerin bile olağanüstü zorluklar taşıyan sorunlar yarattığı görülmektedir. Oysa düzen, bu sistemlerin içinde kendi kendine oluşmakta -

yani kaos ve düzen bir arada bulunmaktadır. Herhangi bir şeyin - mesela bir su molekülünün, kalp dokusundaki bir hücrenin, bir nöronun - ne yaptığının bilgisi ile bunlardan milyonlarcasının ne yaptığının bilgisi arasındaki büyük uçurumu aşmaya ancak yeni bir bilim türü ile başlanabilir.

Bir şelalenin aşağısında yan yana yüzen iki su köpüğü kabarcığını dikkatle izleyin. Bunların yukarıda iken birbirlerine ne kadar yakın olduğu hakkında bir tahmin yürütebilir misiniz? Yürütemezsiniz. Standart fizik açısından bakıldığında, Tanrı pekâlâ bütün bu su moleküllerini alıp masanın altında kendi elleriyle karıştırmış olabilir. Fizikçilerin, normal olarak, karmaşık sonuçlarla karşılaştıklarında karmaşık nedenler aramaları gelenek olmuştur. Bir sistemin içine girenle o sistemden çıkan arasında gelişigüzel bir ilişki gördüklerinde gerçekçi bir teoriye gelişigüzellik katmak için, yapay olarak gürültü ya da yanılgı ilave etmeleri gerektiğine inanmışlardır. Kaosun çağdaş düzeyde ele alınarak incelenmesine, 1960'lı yıllarda, çok basit matematik denklemleri kullanılarak şelale örneğindeki gibi şiddetli sistemleri simüle etmek imkânı bulunduğunun farkına varılmasıyla başlanmıştır. Girdilerdeki küçük küçük farklar çıktılarda yerini hızla, akıl almayacak büyüklükteki farklara bırakabiliyordu - bu da "başlangıç durumuna hassas bağlılık" adı verilen bir olguydu. Mesela, hava söz konusu olduğunda, bu olgu, yarı şaka yarı ciddi Kelebek Etkisi olarak bilinen - bugün Pekin'de kanatlarını çırpan bir kelebeğin havada oluşturduğu dalgaların gelecek ay New York'ta fırtına sistemlerine dönüşmesi kavramı - olarak ifade edilmektedir.

Kaosu keşfetmeye kalkışanlar sahip çıktıkları bu yeni bilim dalının soy kütüğü üzerine eğilmeye başladıklarında, geçmişten bugüne intikal eden birçok fikrin izini bulmuşlardır. Bunlardan bir tanesi diğerlerinden ayrılarak hemen fark edilmekteydi. Devrimin öncülüğünü yapan genç fizikçi ve matematikçilere göre, çıkış noktalarından biri hiç tereddütsüz, Kelebek Etkisi olmuştur.

Kelebek Etkisi

Fizikçiler yapılacak tek şey olarak, "İşte, şartlar böyle, bundan sonra bakalım ne olacak?" diye düşünmekten hoşlanırlar.

RICHARD P. FEYNMAN

Güneşin battığı bu gökyüzünden daha hiçbir bulutun gölgesi geçmemişti. Rüzgârların üzerinde esip süpürdüğü topraklar cam yüzeyi gibi dümdüzdü. Gece hiç gelmiyor, mevsim bir türlü sonbahardan kışa dönmüyordu. Yağmur hiç yağmıyordu. Edward Lorenz'in yeni elektronik bilgisayarında gerçekleştirdiği simülasyonda[1] hava yavaş yavaş fakat şaşmaz bir kararlılıkla değişirken, ancak masallardaki peri padişahlarının ülkelerinde görülen ya da Güney Kaliforniya'nın özel olarak daha da ılıman hale getirilmiş bir ikliminde yaşanan yağışsız bir yaz gününün öğle saatleri sıcağına takılıp kalmış bir gökyüzü sanki dünyayı kuşatmıştı.

Aslında, Lorenz'in havanın gerçekte nasıl olduğunu anlaması için, penceresinden dışarı bakıp sabahın erken saatlerinde ortalığa yayılan sisin Massachusetts Institute of Technology (Massachusetts Teknoloji Enstitüsü) kampüsünü yavaş yavaş kapladığını ya da alçaklardaki bulutların Atlantik okyanusundan karaya doğru ilerleyip binaların çatıları üzerinden kaydığını görmesi de yeterliydi. Bilgisayarında canlandırdığı modelde hiçbir zaman ne sisin ne de bulutların yeri olmuştu. Royal McBee marka makinesi sadece bir kablo yumağından ve vakumlu tüplerden oluşan hantal bir yığın halinde Lorenz'in bürosunun büyük bir kısmını iş-

gal etmekle kalmıyor, üstüne üstelik akıl sır ermeyen, sinir bozucu sesler çıkartıyor ve haftada en az bir, iki kez bozuluyordu. Ne hızı ne de bellek gücü bakımından atmosfer ve okyanuslar için gerçeği yansıtan bir simülasyon uygulamaya müsait değildi. Oysa Lorenz'in 1960'da icat ettiği minyatür meteoroloji modeli, meslektaşlarının akıllarını başından almaya yetmişti. Makine bir sayfanın üzerine dakikada bir, bir sıra rakam basarak bir gün geçtiğini kaydediyordu. Eğer basılı metinlerin nasıl okunacağını biliyorsanız batıdan esen hâkim bir rüzgârın şimdi kuzeye, şimdi güneye, şimdi tekrar kuzeye döndüğünü görebiliyordunuz. Sayısallaştırılmış siklonlar ideale yakın bir şekil verilmiş bir yerküre çevresinde yavaşça dönmekteydi. Bu buluşun haberi Dairede duyulduktan sonra, öbür meteorologlar makinenin başında lisansüstü öğrencileriyle toplanıp Lorenz'in hava durumunun bundan sonra ne yapacağı hakkında iddiaya tutuşmayı âdet edindiler. Kaldı ki, aynı şeyin iki kere tekrarlandığı hiç görülmemişti.

Lorenz meteorolojiye bayılıyordu - ancak meteoroloji alanında araştırıcı olmak için böyle bir şart yoktu. Onun zevk aldığı tarafı, meteorolojinin doğasında bulunan değişkenlikti. Atmosferde oluşup kaybolan şekillerin, anafor ve siklon gruplaşmalarının daima matematiksel kurallara uymaları, fakat asla tekerrür etmeyişleri çok hoşuna gidiyordu. Baktığı bulutların bir tür yapıya sahip olduklarını düşünüyordu. Bir zamanlar, meteoroloji araştırmaları yapmanın adeta eline tornavidayı alıp içinden kukla fırlayan yaylı bir oyuncak kutusunu söküp parçalamak gibi bir şey olduğunu düşünmüş ve bu fikir onu bayağı ürkütmüştü. Şimdi ise bilimin bu büyünün esrarını çözüp çözemeyeceğinin merakı içindeydi. Hava durumunun öyle çekici bir yönü vardı ki, bunu birtakım ortalama rakamlarla ifade etmenin imkânı yoktu. *Massachusetts'in Cambridge şehrinde Haziran ayında günlük en yüksek sıcaklık ortalama 24 °C'yi* bulur. Suudi Arabistan'ın Riyad şehrinde yağışlı gün sayısı yılda ortalama ondur.* Bunlar istatistiki bilgilerdi. Asıl bakılması gereken konu at-

*İngilizce metinde 75 derece fahrenheit. (ç.n.)

mosferdeki şekillerin zaman içinde nasıl değiştikleriydi ki, Lorenz'in Royal MacBee'de yakalamayı başardığı buydu.

Makinesinde kendi kendine yarattığı âlemin Tanrısı olarak, tabiatın yasalarını canı nasıl isterse öyle seçmekte tamamen serbestti. Fakat sadece insanlara özgü olan deneme ve yanılmalar sayesinde Lorenz'in belirli bir birikimi oluştuktan sonra, bu yasalardan yalnızca on ikisini seçti. Bunlar sayısal kurallardı[2] - sıcaklık ile basınç arasındaki ilişkileri, basınçla rüzgâr hızı arasındaki ilişkileri ifade eden denklemler. Lorenz uygulama alanına koyduğu kuralların Newton kanunları olduğunu anlamıştı; bu kanunlar, aynen saatçi ustası bir tanrısal gücün önce dünyayı yaratıp sonra da ebediyete kadar çalışacak şekilde ayarlaması gibi, bu iş için en uygun olan araç ve gereçleri teşkil ediyordu. Fizik yasalarının determinizmi sayesinde, bundan sonra herhangi bir müdahaleye ihtiyaç kalmayacaktı. Bu gibi modelleri icat edenler, hareketle ilgili kanunların bugün ile gelecek arasında matematiksel kesinliğe dayalı bir köprü oluşturduğunu kabul ediyorlardı. Yasaları anladınız mı evreni de anlamış oluyordunuz. Hava durumunu bir bilgisayarda modellemenin temelinde yatan felsefe buydu.

Gerçekten de, Yaradanlarını merhametli, müdahale etmeyen, arka planda kalmayı yeğleyen bir yaratıcı olarak tasavvur eden on sekizinci yüzyıl filozoflarının aklında her halde Lorenz gibi birisi vardı. Lorenz bilinen meteorologlara hiç benzemiyordu. Kuzey Amerikalı çiftçilerinki gibi yorgun ve yıpranmış bir yüzün ortasında inanılmayacak kadar ışıl ışıl parlayan gözleri, gülse de gülmese de çehresine devamlı bir tebessüm ifadesi veriyordu. Kendisinden ya da işinden nadiren bahseder, genellikle konuşmak yerine dinlemeyi tercih ederdi. Arkadaşlarının bir türlü çözemedikleri hesaplara ya da hayalgücünü zorlayan konulara gömüldüğünde kendini tamamen unuturdu. En yakın dostlarının onun hakkında ne düşündüğünü sorarsanız alacağınız cevap şuydu: Lorenz zamanının epeyi büyük bir kısmını, başkalarından uzaktaki apayrı bir âlemde geçirmekteydi.

Meteorolojiye daha çocukluğunda merak sararak, ailesinin Connecticut'ın West Hartford kasabasındaki evlerinde,

her günkü en yüksek ve en düşük sıcaklık değerlerini tespit eden maksimal-minimal termometrenin gösterdiği rakamların kaydını muntazaman tutmayı kendine vazife edinmişti. Evin içindeki en büyük eğlencesi ise termometreye bakmaktan çok matematik bulmacaları çözmekti. Bazen babasıyla beraber oturur, problem çözmeye çalışırlardı. Bir keresinde gayet zor bir probleme çattılar; bütün uğraşmalarına rağmen çözümsüz olduğu ortaya çıktı. Bunun da yanlış olmadığını söyledi babası: "Bir problemin hiçbir çözümü bulunmadığını ispat etmek yoluyla da problemi çözmüş sayılabilirsin." Bu fikir Lorenz'in hoşuna gitmişti, çünkü matematiğin saflığı[3] karşısında her zaman duyduğu hayranlığı hiç saklamamıştı; nitekim 1938'de Dartmouth Yüksekokulundan mezun olduğunda, kaderinin matematikten açılmış olduğuna iyice inanmıştı. Ne var ki, şartlar beklediği gibi çıkmayıp İkinci Dünya Savaşı şeklinde tecelli edince Kara Kuvvetlerinin Havacı Birliklerinde hava tahminleri memuru olarak görev yaptı. Savaştan sonra Lorenz meteoroloji alanında kalmaya karar vermişti bile; meteoroloji teorisini araştırıp matematik bilgisini biraz daha ileri boyutlara götürecekti. Atmosferin genel dolaşımı gibi klasik meseleler üzerine bir eser yayınlayarak adını bilim çevrelerine duyurdu. Aynı zamanda, hava tahminleri hakkındaki düşüncelerini geliştirmeye de ara vermiş değildi.

Ciddiyetiyle tanınan meteoroloji uzmanlarının birçoğuna göre, hava tahmini konusu bir bilim dalı sayılmazdı. Teknisyen düzeyinde yapılan ve pek fazla ciddiye alınmaması gerektiği düşünülen bir işti; buna göre bir sonraki günün hava durumunu aletler ve bulutlara bakıp kestirmek için sezgi yönü güçlü bir yeteneğe sahip olmak yeterliydi. Tahmin işinden başka bir şey değildi. M.I.T.* gibi merkezlerde, meteorolojinin ilgi alanı daha ziyade çözümü olan problemlerdi. Lorenz havayı tahmin etme sorununu ordu pilotlarının yararlanması için bizzat denemiş bulunduğundan, bunun ne kadar karışık bir bir iş olduğunu anlıyor, ancak matematiğe

*Massachusetts Institute Of Technology (Massachusettes Teknoloji Üniversitesi). (ç.n.)

duyduğu ilgi dolayısıyla, hava tahmini meselesiyle ilgilenmekten de kendini alamıyordu.

Meteoroloji uzmanlarının küçümsediği tek şey hava durumu tahminleri değildi; 1960'lı yıllarda ciddi bilim adamlarının hemen hemen hepsinde bilgisayarlara karşı bir güvensizlik duygusu vardı. Takviyeli güç takılmış bu hesap makinelerinin teorik düzeyde yapılan bilimsel çalışmalarında kullanılmasına akılları pek yatmıyordu. Dolayısıyla hava durumunu sayısal bir modele dökme çabası meseleyi yozlaştırmaktan başka bir şey değildi. Oysa bu çabayı göstermenin tam da zamanıydı. Hava durumu tahmini işi, binlerce hesap işlemini durmadan düşünmeden otomatik olarak tekrarlayabilecek bir makineye kavuşmayı iki yüzyıldan beri beklemekteydi. Zaten, determinist yaklaşım çerçevesinde, dünyanın da, gezegenlerde olduğu gibi belirli kurallara uygun olarak düzenlenmiş, eklipsler ve gelgit olayları gibi önceden bilinmeye müsait bir güzergâh üzerinde yol aldığını öneren Newtoncu ilkelerin doğrulanmasını ancak bilgisayar sağlayabilirdi. Astronomi bilginlerinin evvelce kurşun kalem ve hesap cetveliyle yapabildikleri işlemler olarak, evrenin ilk başta mevcut olan şartlarından ve evrimini yöneten fizik yasalarından yola çıkıp geleceği hakkında hükme varmak gibi işleri meteoroloji uzmanları teorik olarak ancak bilgisayarla yapabilirlerdi. Hava ile suyun hareketini tanımlayan denklemler de gezegenlerin hareketini tanımlayan denklemler kadar biliniyordu. Astronomi uzmanları mükemmeli bulabilmiş değillerdir; kaldı ki, kendi çekim güçlerine sahip dokuz gezegen, birçok ay ve binlerce asteroidin birbirini çekmesi sonucu birarada duran bir güneş sistemi içinde hiç bulabilecekleri de yoktur; ne var ki, gezegenlerin hareketleri üzerinde yapılan hesaplamalar o kadar kesinlik arzeder ki, insanlar bunların tahminlerden ibaret olduğunu unutmuşlardır. Bir astronomi uzmanı, "Halley kuyrukluyıldızı yetmiş altı yıl sonra tekrar gelecek," dediği zaman bu sözü herkes gerçeğin ifadesi olarak görür, kimse bunun kehanet olduğunu düşünmez. Determinist yaklaşımla yapılan sayısal tahmin yöntemiyle uzay gemileri ve füzeler için en hassas ve

şaşmaz rotaların çizilmesi mümkün olmuştur. O halde neden rüzgârlar ve bulutlar için mümkün olmasın?

Hava durumu çok daha karmaşık bir konuydu; gene de aynı yasalara tabiydi. Belki de Laplace'ın hayalindeki üstün zekâ, yeterli güce sahip bir bilgisayardı. On sekizinci yüzyılda yaşamış bulunan bu filozof matematikçi herkesten daha fazla tutulduğu Newton hummasının etkisiyle şöyle yazmıştı: "Böylesine bir zekâ evrendeki en büyük cisimlerin hareketleriyle en hafif atomların hareketlerini aynı formül içinde kucaklamaya muktedirdir[1]; bu zekânın karşısında belirsizlik adında hiçbir şey yoktur; gözünden ne geçmişin ne de geleceğin kaçması mümkün değildir." Einstein'ın relativitesiyle Heisenberg'in belirsizlik teorisinin hüküm sürdüğü günümüzde, Laplace'ın sergilediği iyimserlik havası insanlara adeta komik gelmektedir; ancak, modern bilim de büyük ölçüde Laplace'ın hayal ettiği yolda ilerlemekten geri kalmamıştır. Açıkça ifade edilmemekle birlikte, yirminci yüzyılda yaşayan biyolog, nörolog, ekonomist gibi bilim adamlarından birçoğunun misyonu, kendi evrenlerini bilimsel kurallara itaat edecek en basit atomlara bölmek şeklinde olmuştur. Bütün bu bilimlerde, bir çeşit Newtoncu determinizm devreye girmiştir. Laplace modern bilgisayar biliminin kurucularının da gözünde her zaman örnek teşkil etmiş, 1950'li yıllarda, John von Neumann New Jersey eyaletinin Princeton şehrindeki The Institute for Advanced Study'de (Yüksek Araştırmalar Enstitüsü) ilk makinelerinin dizaynını gerçekleştirdiğinden bu yana bilgisayarcılığın tarihi ile hava durumu tahminciliğinin tarihi de birbiriyle içiçe girmiştir. Von Neumann hava durumu modellemesini tam bilgisayara göre biçilmiş kaftan olarak değerlendirmiştir.

Ancak herkesin görüşlerinden fedakârlık yapmasıyla sağlanmış ufacık bir uzlaşma her zaman vardır ki, küçüklüğü dolayısıyla araştırıcılar genellikle onun mevcudiyetini unutmuşlar, ödenmeden kalmış bir fatura gibi felsefelerinin bir köşesine gömmüşlerdir. Ölçümlerin mükemmel olması asla mümkün olmayacaktır. Newton'u kendilerine rehber edinip onun yolunda ilerleyen bilim adamları gerçekte bambaşka

bir söylem tutturmuşlardır; bunu şöyle ifade edebiliriz: Bir sistemin başlangıç durumundaki şartları hakkında *yaklaşık olarak* bir bilgiye sahip olan ve tabiat kanununu anlayabilen bir insanın sistemin *yaklaşık* davranış biçimini hesaplaması mümkündür. Bu varsayım bilimin felsefi temelini teşkil eder. Teorik fizikçi bir öğretim üyesinin öğrencilerine sık sık söylediği şu sözlerde olduğu gibi: "Batı biliminin[5] temel düşüncesine göre, dünyamızdaki bir bilardo masası üzerinde yuvarlanan bir topun hareketini tanımlayıp açıklamaya çalışırken, başka bir galaksinin gezegenlerinden birinde dalından kopan bir yaprağın düşüşünü dikkate almanız gerekmez. Algılanamayacak kadar küçük etkiler ihmal edilebilir. Olayların cereyan ediş tarzı sonuçta aynı kapıya çıkar; kişisel bir yoruma göre küçük sayılan bir sebep önem kazanıp, keza insanın keyfine kalmış yorumlara göre büyük sayılacak sonuçlar doğurmaz." Klasik bir yaklaşım olarak, yaklaşık değer alma ve yakınsaklığa inanmanın geçerli sebepleri vardı. Hiç aksamadan yürüyordu. Halley kuyrukluyıldızının 1910 yılındaki pozisyonunu tespit ederken yapılacak minicik bir hata, 1986 yılında dünyaya gelişi öngörüldüğü sırada olsa olsa minicik bir hataya sebebiyet verebilir; bundan sonra milyonlarca yıl boyunca da küçük bir hata olarak kalabilirdi. Bilgisayarların uzay gemilerini yönetirken dayandıkları varsayım bundan farklı değildir: yaklaşık olarak doğru ve kesin bir girdi, yaklaşık olarak doğru ve kesin çıktı verir. İktisadi durumu yorumlayıp gelecek hakkında tahminler yürüten ekonomistler de bu varsayıma dayanırlar, fakat başarı düzeyleri diğerinde olduğu kadar açıkça görünmez. Global düzeyde hava durum tahmini konusunun öncülüğünü yapanlar da aynı şeyi yapmışlardır.

Lorenz ilkel bilgisayarını kullanarak havayı en basit şekilde ifade edilebilir bir hale indirgemişti. Oysa rüzgârlar ve hava sıcaklıkları Lorenz'in yazıcısından satır satır dökülürken dünyada nasıl gerçekleşiyorsa adeta aynı davranış biçimini gösteriyordu. Bu etmenler hava durumuyla ilgili olarak onun gönlünde yatan sezgilere tamamen denk düşüyor; hava şartlarının kendi kendini durmadan tekrarladığı, yükse-

len ya da düşen basınç gibi, kuzeyden güneye salınan hava akımları gibi alışılagelmiş şekilleri zaman içinde yeniden oluşturup ortaya çıkardığına ilişkin hislerini doğruluyordu. O sırada şunu da keşfetti: bir doğru yukardan aşağıya hiçbir sıçrama yapmadan iniyorsa bir sonraki durumda iki kere sıçrama yapmaktaydı. Bunun üzerine, "Böylesi ancak hava durumu tahmini yapan uzmanlar tarafından kullanılabilecek bir kuraldır,"[6] dedi. Ne var ki, tekrarlanan olaylar asla birbirinin aynı değildi. Şekil mevcuttu, ancak şekilde bozulmalar da vardı. Düzenli bir düzensizlik.

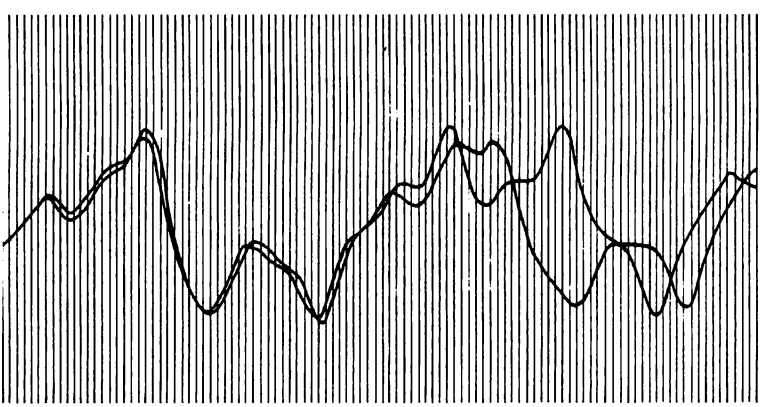
Bu şekilleri daha da iyi görülebilir hale getirmek için Lorenz çok basit bir grafik çizimi icat etti. Normalde sayılardan oluşan bildiğimiz çizgileri basmak yerine makineyi öyle ayarladı ki belirli bir miktar boşluklar bırakıyor, sonra da bir *a* harfi basıyordu. Bir değişken seçiyordu - mesela hava akımının yönünü alıyordu. Kâğıt üzerine basılan a'lar yavaş yavaş sayfanın altına doğru iniyor, dalgalı bir hat üzerinde salınarak, birbirini izleyen tepe ve vadi şekillerinden oluşan uzun diziler meydana getiriyordu; bunlar da kıtanın bir başıyla öbür başı arasında batı rüzgârının kuzeyden güneye salınma hareketini temsil ediyordu. Gerek bu hareketin düzenliliğinde gerekse göze yabancı gelmemekle birlikte bir görünüp bir kaybolduktan sonra yeniden ortaya çıktığında asla birbirine tıpkı tıpkısına benzemeyen bu devirlerde, adeta insanın aklını başından alan bir büyü vardı. Sistem sanki sırlarını meteoroloji uzmanına yavaş yavaş açıklamaya başlamış gibiydi.

1961 yılının kış aylarından bir gün, Lorenz bu ardışık dizilerden birini uzun uzadıya incelemek istediği bir sırada kestirme bir yol izlemeye kalkıştı. Programı tekrar başa dönüp çalıştırmak yerine ortalardan bir yerden başladı. Makineye başlangıç durumundaki şartları vermek için, daha önce yazıcıdan çıkardığı dizilere bakıp oradaki sayıları klavyeden aynen girdi. Sonra da hem makinenin gürültüsünden kaçmak hem de bir fincan kahve içmek üzere koridorun sonundaki hole gitti. Bir saat kadar sonra döndüğünde hiç ummadığı bir şeyle karşılaştı; hem de öyle bir şey ki bununla artık yepyeni bir bilim dalı filizlenmeye başlıyordu.

Bilgisayarın yaptığı bu dökümde bir önceki dökümün tıpatıp tekrarlanması gerekirdi. Lorenz aynı sayıları makineye kendi eliyle girmişti. Program da bir değişiklik yoktu. Oysa Lorenz yazıcıdan yeni çıkan döküme baktığında gördüğü şey şuydu: Hava durumu bir önceki dökümde yer alan şekilden o kadar hızla uzaklaşmaktaydı ki, bir kaç aylık bir süre zarfında, aradaki bütün benzerlik ortadan kalkmıştı. Lorenz bir bu sayı kümesine baktı, bir de önceki sayı kümesine. Sanki bir şapkanın içinden rasgele iki hava durumu seçip almış gibiydi. İlk aklına gelen şey, gene vakumlu tüplerden birinin bozulduğu oldu.

Birden gerçeğin farkına vardı.[7] Makine bozulmuş filan değildi. Mesele makineye işlediği sayılardan kaynaklanıyordu. Bilgisayarın hafızasına kaydedilen ondalık kesir sayıları altı haneydi: .506127. Yazıcıdan çıkan dökümde ise yerden kazanmak için, sadece üç hane görünüyordu: .506. Lorenz sayıları kısaltarak son üç rakamı yuvarlamış, binde birlik bir farkın sonucu etkilemeyeceğini düşünmüştü.

Aslında bu varsayımın akla aykırı bir yanı yoktu. Bir meteoroloji uydusu okyanusun yüzeyindeki sıcaklığı binde bir-



METEOROLOJİK İKİ ŞEKİL BİRBİRİNDEN NASIL UZAKLAŞIR. Edward Lorenz, bilgisayarının çizdiği hava durumuna ilişkin şekillerin, hemen hemen aynı çıkış noktasından hareket etmelerine rağmen birbirlerinden gittikçe uzaklaştıklarını, hatta sonunda aralarındaki benzerliğin de tamamen yok olduğunu gözlemiştir (Lorenz'in 1961 yılında aldığı bilgisayar dökümlerinden.)

lik bir hassaslıkla okuduğunda, uzmanlar kendilerini şanslı addederler. Lorenz'in Royal McBee'si klasik programı uyguluyordu. Tamamiyle determinizme dayalı bir denklemler sistemi kullanmaktaydı. Belirli bir çıkış noktasından hareket edildiğinde hava durumunun her seferinde tıpatıp aynı gelişmeyi göstermesi gerekirdi. Biraz daha farklı bir çıkış noktasından hareket edildiğinde, hava durumunun da biraz daha farklı bir gelişme göstermesi gerekecekti. Küçücük bir sayı hatasının rüzgârın hafif bir esintisinden farkı yoktu; tabii ki, hafif esintiler hava durumunda önemli, büyük ölçekli değişimleri meydana getirmeden önce ya zayıflayıp ortadan yok oluyorlar ya da birbirlerini dengeliyorlardı. Oysa Lorenz'in kendine özgü denklemler sisteminde küçücük hatalardan büyük felaketler doğmaktaydı.[8]

Bunun üzerine Lorenz birbirinin hemen hemen aynı olan iki hava durumu işleminin birbirinden bu kadar nasıl uzaklaştığı konusunu daha yakından incelemeye karar verdi. Çıktılardan birindeki dalgalı eğrilerden birini saydam bir kâğıda kopyaladıktan sonra diğerinin üstüne tatbik ederek ne tarz bir ayrılık gösterdiğini tespit etmeye çalıştı. İlk başta, grafikteki iki yüksek nokta en küçük ayrıntısına kadar çakışıyordu. Sonra eğrilerden biri kıl payıyla diğerinin gerisinde kalmaya başlıyordu. İki işlem devam edip eğriler bir sonraki yükseliş pozisyonuna geldiğinde, artık aralarındaki uyum gözle görülür derecede kaybolmaktaydı. Üçüncü veya dördüncü yükseliş noktalarında, artık aralarında hiç benzerlik kalmamıştı.

Bu durumda akla gelen tek şey, hantal bir bilgisayarın arızalı çalışması sonucu ortaya bir aksaklık çıkmış olmasıydı. Lorenz, normal olarak o acayip makinesinin hata yaptığını düşünebilir ya da programındaki modelin bir şeyleri yanlış yaptığı sonucuna varabilirdi - aslında böyle bir varsayımı kabul etmesi *gerekirdi* de. Bu iş sodyumla kloru birleştirip altın elde etmeye benzemiyordu. Ancak, bu noktada Lorenz'in matematiksel sezgisinden kaynaklanan birtakım nedenler devreye girdi; arkadaşları bile bunu çok daha sonraları anlayacaklardı. Lorenz'in kafasında bir şimşek çaktı:

Felsefi açıdan bakıldığında bir şeyler yerli yerine oturmuyordu. Oysa, olay uygulama açısından akıllara durgunluk verecek derecede büyük bir önem taşıyordu. Bu denklemleri aslında dünyamızın hava durumunu üstünkörü bir şekilde canlandırmak amacıyla kurmuş olmasına rağmen, içinden bir ses aynı denklemlerle gerçek atmosferin özünü yakalamış olduğunu ona fısıldıyordu. Bu ilk günün neticesinde, uzun süreli hava durumu tahmininden bir sonuç alınamayacağına hükmetti.[9]

"Bu işte doğrusu başarılı olamamıştık ama şimdi hiç olmazsa bir mazeretimiz vardı," diyordu.[10] "İnsanlar çok uzun süreli hava tahminleri yapmanın mümkün olduğunu düşünüyorlarsa bunun nedenlerinden biri, galiba, çok mükemmel tahminler yapılabilecek bazı fiziksel fenomenler mevcut bulunmasıdır; bunlar arasında mesela güneş ve ay tutulmasını sayabiliriz ki bunlarda güneşin, ayın ve dünyanın dinamikleri oldukça karmaşıktır; mesela okyanuslardaki gelgit olaylarını da sayabiliriz. Gelgit olayı tahminlerini ben hiçbir zaman öngörülmesi gereken bir olay olarak düşünmedim - bunlara daima bir gerçekliğin ifadesi olarak bakmışımdır - ama tabii, öyle de olsa bir olayı öngörmüş bulunuyorsunuz. Gerçekte gelgitler atmosfer kadar karmaşık olaylardır. İkisinde de periyodik öğeler vardır - gelecek yazın bu kıştan daha sıcak olacağını öngörebilirsiniz. Fakat hava durumu bahis konusu olunca bizim tutumumuz "biz bunu zaten biliyorduk" şeklinde olmaktadır. Gelgitler bahis konusu olduğunda, bizi ilgilendiren yönü öngörülebilen tarafıdır, öngörülemeyen yönü ise ihmal edilebilir derecede küçüktür, yeter ki bir fırtına çıkmasın.

"Gelgitleri aylarca öncesinden epeyi doğru şekilde öngörebildiğimizi gören normal insanlar, atmosfer söz konusu olunca aynı şeyi neden yapamadığımızı soracaklardır; nihayet o da başka bir akışkan sistemdir, yasaları en az bunun kadar karmaşıktır. Ancak, ben periyodik olmayan davranış özellikleri gösteren hiçbir fiziksel sistemde öngörü yapmanın mümkün olmadığını artık anlamış bulunuyorum."

1950'li ve 1960'lı yıllar hava durumu tahmini işinde gerçekçilikten uzak bir iyimserliğin hüküm sürdüğü yıllardı.[11]

Gazeteler, dergiler meteoroloji biliminin geleceği hakkında ümit dolu yazılar yayınlıyorlardı; sadece öngörme konusu değil modifikasyon ve kontrol konuları da bu çerçevede ele alınıyordu. Birlikte olgunlaşan yeni iki teknoloji vardı, bunlar sayısal hesap makinesi ve uzay uydu teknolojileriydi. Bunlardan istifade sağlamak üzere The Global Atmosphere Research Program (Global Atmosfer Araştırma Programı) adı altında uluslararası bir program hazırlanmaktaydı. O zamanki düşünceye göre, insan atmosferdeki çalkantılardan kurtulacak ve havanın esiri olmak yerine havaya hükmeder hale gelecekti. Jeodezi kubbeleri mısır tarlalarının üstünü örtecekti. Uçaklar bulutları tohumlayacaktı. Bilim adamları yağmur yağdırmayı, yağan yağmuru da durdurmayı öğreneceklerdi.

Halk arasındaki bu inanışın fikir babası Von Neumann'dı; ilk bilgisayarını imal ederken çeşitli alanlarda kullanmayı düşünmekle birlikte Von Neumann'ın asıl niyeti havayı kontrol etmekti. Etrafına meteoroloji uzmanlarını topluyor ve kendisini adeta nefes almadan dinleyen genel fizikçilere aklındaki projeleri anlatıyordu. İyimserliğinin temelinde kendine özgü bazı matematiksel nedenler vardı. Komplike bir dinamik sistemde birtakım istikrarsızlık noktaları olabileceğini kabul ediyordu; bunlar öyle kritik noktalardı ki, bir dağın tepesinde dengede duran bir top örneğindeki gibi, parmağınızın ucuyla hafifçe iterek vereceğiniz bir hareketin muazzam sonuçları olabiliyordu. Bilgisayarını kurup çalıştırmaya başladığında Von Neumann, artık bilim adamlarının sıvıların hareketine ilişkin denklemleri birkaç gün içinde çözebileceklerini hayalinden geçirmekteydi.[12] Bundan sonra merkezde meteoroloji uzmanlarından oluşan bir komisyona, uçakları gönderip göğü duman perdeleriyle örtmek ya da bulutları tohumlayarak arzuya göre hava şartları yaratmak kalacaktı. Ne var ki, Von Neumann kaos ihtimalini atlamış, yani *her* noktada istikrarsızlık olabileceğini nazarı itibara almamıştı.

1980'li yıllara gelinceye kadar, sayısı ve masrafı kabarık bir bürokratik mekanizmanın mesaisinin tamamı Von Neumann'ın programını gerçekleştirmeye ya da en azından bu

programın tahminlerle ilgili kısmını yürütmeye harcandı.[13] Amerika'nın ilk hava durumu tahmin uzmanları Maryland'ın banliyösünde, Washington çevre yolunun hemen yakınındaki dört köşe biçimli, hiçbir gösterişi olmayan, çatısının üzerindeki radarlar ve telsiz antenleriyle casus yuvasına benzemiş bir binada faaliyet gösterdiler. Süper bilgisayarlarında üzerinde çalıştıkları model ile Lorenz'in modeli arasındaki tek benzerlik sadece işin temel esprisindeydi. Royal McBee saniyede ancak altmış çarpım işlemi yapabiliyordu; oysa Control Data Cyber 205'in hızı megafloplarla, saniyede milyonlarca floating-point işlemleriyle ölçülmekteydi. Lorenz on iki denklemle mutlu oluyordu; modern global modelde ise denklem sayısı 500.000'e varan sistemlerin hesapları yapılabilmekteydi. Bu modelle, nem kondanse olduğunda ve buhara dönüştüğünde ısıyı havaya nasıl verdiği ya da havadan nasıl aldığı anlaşılıyordu. Sayısal rüzgârların şeklini sayısal dağ silsileleri belirliyordu. Dünyanın her ülkesinden, uçaklardan, uydulardan, gemilerden saat başı veriler akıp duruyordu. The National Meteorological Center (Ulusal Meteoroloji Merkezi) dünyadaki en iyi hava durumunu tahminlerini üretmek bakımından ikinci sırada gelmekteydi.

En isabetli tahminler İngiltere'de, Londra'ya otomobille bir saat mesafedeki küçük bir okul şehri olan Reading'den geliyordu. The European Center for Medium Range Weather Forecasts (Avrupa Orta Süreli Hava Durumu Tahminleri Merkezi) Birleşmiş Milletler Teşkilâtı binaları gibi tuğla ve cam karışımı modern bir mimari tarzıyla inşa edilmiş ve çeşitli ülkelerden gönderilen hediyelerle süslenmiş, ağaçların gölgelediği mütevazi bir binada faaliyet göstermekteydi. Avrupa'da Ortak Pazar oluşturma düşüncesinin heyecan yarattığı bir dönemde, batı Avrupa ülkelerinden birçoğunun hava durumu tahminlerini geliştirmek üzere yeteneklerini ve kaynaklarını bir araya getirdikleri günlerde inşa edilmişti. Avrupalılara göre, başarılarının temelinde genç ve sözleşmeli (memur zihniyeti olmadan) bir kadro ile Amerika'daki benzeri kuruluştan daima bir model daha önde olan Cray süper bilgisayarı yatıyordu.

Karmaşık sistemlerin modellenmesinde bilgisayarın ilk kullanıldığı alan olarak hava durumu tahmini, böylece yepyeni bir alan açılmasını sağlamış oluyordu. Uskur dizaynçılarını ilgilendiren küçük ölçekli sıvı akışlarından ekonomistleri ilgilendiren geniş çaplı para akışlarına kadar her alanda ileriye dönük tahminlerde bulunmayı ümit eden araştırıcılar, ister tabii bilimci ister sosyal bilimci olsunlar hep aynı tekniklerden yararlanmışlardır. Hakikaten, yetmişli ve seksenli yıllarda, bilgisayarla ekonomik durum tahmini yapma konusu global hava durumu tahmini yapmak konusuyla gerçek anlamda benzerlik göstermiştir. Modeller, başlangıç durumundaki - atmosfer basıncı ya da para arzı gibi - şartların ölçümünü gelecekteki trendlerin simülasyonuna dönüştürmek amacıyla düzenlenmiş olan ve indî unsurlar taşıyan karmaşık denklemlerle iç içe girip karışmıştır. Programcılar, önlenmesi mümkün olmayan sadeleştirme varsayımları dolayısıyla sonuçların olmayacak şekilde çarpıtılmaması beklentisi içinde olmuşlardır. Model, - Büyük Sahrayı sel bastırmak ya da faiz oranlarını üç katı yükseltmek gibi - göze batacak derecede acayip bir şeyler yapmaya kalkıştığında programcılar denklemleri tekrar elden geçirip sonucu olması gerektiği şekle sokmuşlardır. Uygulama bakımından, geleceğin getireceği olaylar konusunda ekonometrik modellerin gözleri maalesef bağlı kalmış, üstelik bunu en iyi bilmek durumunda olan pek çok kimse de alınan sonuçlara inanmış gibi davranmışlardır. Ekonomik kalkınma ya da işsizlikle ilgili tahminler açıkça söylenmemekle birlikte iki ya da üç ondalık kesirlik bir hassaslıkla ifade edilmiştir.[14] Hükümetler ve finansal kurumlar, ya ihtiyaç duydukları ya da daha iyi bir usul bulamadıkları için bu tahminleri bedeli karşılığında sağlamış ve icraatlarını bunlara dayandırmışlardır. Muhtemeldir ki, "tüketicinin iyimserlik katsayısı" gibi değişkenleri "nem oranı" gibi kolaylıkla ölçmenin mümkün olmadığını, üstelik politik hareketler ve moda için henüz mükemmel diferansiyel denklemleri yazılmamış olduğunu onlar da biliyorlardı. Ne var ki, akış olayını bilgisayarda modelleme sürecine çok fazla ümit bağlanmayacağını bilenlerin sayısı pek

azdı; hatta mevcut verilerin yeterince güvenilir sayılması ve hava durumu tahmini alanında olduğu gibi, kanunların tamamen fiziksel olması halinde bile durumda fark yoktu.

Bilgisayarlı modelleme evvelce bir sanat sayılan meteorolojiyi bilime çevirmekte gerçekten başarılı olmuştur. Avrupa'daki merkezce yapılan değerlendirmelere bakılırsa dünyada her yıl hava durumu tahminleri sayesinde milyarlarca dolar tasarruf edilebilirdi; istatistik açısından da bakılsa bu tahminlere sahip olmak elde hiçbir şey olmamaktan daha iyi idi. Ne var ki, dünyanın en iyi hava tahminleri bile iki, üç günden öteye gitmiyor, bu süreyi aştığında spekülâsyona dönüşüyor, hele altı, yedi güne çıktı mı tamamen değerini kaybediyordu.

Bunun sebebi Kelebek Etkisi idi.[15] Meteorolojideki küçük olaylar açısından bakıldığında (global ölçekte bakarsanız küçük olaylar denince fırtınalar ve tipiler kastedilir) her tahmin hızla değer kaybeder. Hatalar ve belirsizlikler çoğalmakta, zincirleme olaylar halinde gittikçe azarak anafor ve boralardan sadece uydulardan görülebilecek şekilde bütün bir kıtaya yayılan burgaçlara kadar şiddetini arttırmaktadır.

Modern hava durumu modelleri birbirinden yüzer kilometre* uzaklıkta bulunan noktalardan oluşan bir ağ esas alınarak çalışmaktadır; bu durumda bile yer istasyonları ve uydular heryeri göremedikleri için başlangıç şartlarına ilişkin verilerin tahminlere dayandırılması gerekir. Bir de dünyayı birbirinden otuzar santimetre** mesafede bulunan sensörlerle kapladığımızı, yerden başlayıp atmosferin tepesine kadar da gene otuzar santim aralıkla sensörler döşediğimizi farzedelim.[16] Üstelik her sensörün sıcaklık, basınç, nemlilik vesaire gibi meteoroloji uzmanlarının bilmek istediği bütün miktarları şaşmaz bir hassaslıkla tespit ettiğini kabul edelim. Sonsuz güce sahip bir bilgisayar da tam öğle vakti bütün verileri toplasın ve saat 12'yi 1 geçe, sonra 12'yi 2 geçe, sonra 12'yi 3 geçe . . . her noktada ne olacağını hesaplasın.

*İngilizce metinde altmış mil. (ç.n.)

**İngilizce metinde 'fut' - uzunluğu 30,48 cm olan bir İngiliz uzunluk ölçü birimi; çoğulu "fit". (ç.n.)

Gelecek ayın bir gününde, New Jersey'nin Princeton şehrinde havanın güneşli mi yoksa yağmurlu mu olacağını bilgisayarın şimdiden öngörmesi imkânsızdır. Sensörler arasındaki boşluklar öğle saatlerinde, bilgisayarın fark etmesi mümkün olmayan birtakım dalgalanmaları, yani ortalama değerlerden sapmaları gizleyecektir. Saat 12'yi 1 geçtiğinde, dalgalanmaların yarattığı küçük hatalar otuz santimetre daha öteye gitmiş olacaktır. Kısa bir zaman sonra bu hatalar üç metre* daha öteye, az sonra ondan da daha öteye giderek yerkürenin her tarafına yayılacaktır.

Tecrübeli meteoroloji uzmanları bile, bütün bu olayların sezgiyle ters düştüğü kanaatindedir. Lorenz'in M.I.T.'de birlikte çalıştığı en eski arkadaşlarından biri olan Robert White, daha sonra The National Oceanic and Atmospheric Administration'un (Ulusal Okyanuslar ve Atmosfer İdaresi) başına getirilmiştir. Lorenz ona Kelebek Etkisinden ve bu olayı uzun süreli tahminler bakımından ne kadar önemli gördüğünden bahsetmişti. White da ona aynı Von Neumann'ın vereceği cevabı verdi. "Tahmin hiçbir şey ifade etmez," dedi.[17] "Asıl iş, havayı kontrol edebilmektir." White insanların elinden gelebilecek bazı küçük değişiklikleri yaparak arzu edilen büyük ölçekli değişmelerin sağlanabileceği düşüncesindeydi.

Lorenz soruna bambaşka bir açıdan bakıyordu. Evet, havayı değiştirebilirdiniz. Havanın kendi haline bırakıldığında yapacağı şeyden daha farklı bir şey yapmasını sağlayabilirdiniz. Ama siz bunu gerçekleştirdiğiniz takdirde, havanın kendi haline bırakıldığında ne yapacağını hiçbir zaman *bilemeyecektiniz*. İyi karıştırılmış bir deste iskambile son bir tarak daha atmış gibi olacaktınız. Bunu yapınca şansınızı değiştirmiş olacağınızı bilirsiniz, fakat iyi yönde mi yoksa kötü yönde mi değiştirir, işte bunu bilemezsiniz.

Lorenz keşfini tamamen bir tesadüfe borçluydu; böylece Arşimed'in hamamdaki buluşuna kadar uzanan tesadüfe dayalı keşifler dizisine yeni bir halka eklenmiş oluyordu. Lorenz öyle yerinden fırlayıp *Eureka* diye bağıracak tipte bir insan değildi. Bulunduğu yere "abdülmucitlik" sayesinde

*İngilizce metinde on fit. (ç.n.)

gelmiş değildi. Kollarını sıvayıp yaptığı keşfin sonuçlarını derinliğine araştırmak; her ne türden olursa olsun sıvıların içindeki akış olaylarının bilim açısından ne ifade ettiği konusunu enine boyuna değerlendirmek artık boynunun borcu olmuştu.

Lorenz konuyu tamamen gelişigüzelliğe yönelen bir öngörülebilirlik imajı olarak sadece Kelebek Etkisine getirip o halde bıraksa sadece felâket tellâllığı yapmış olurdu. Oysa meteoroloji modelinde bu gelişigüzelliğin ötesinde bir şeyler daha bulunduğunu fark etti. İnce bir geometrik yapı çerçevesinde, gelişigüzellik kılığına bürünmüş bir düzenin mevcut olduğunu gördü. Bakarsanız Lorenz de önceleri meteoroloji kıyafeti giymiş bir matematikçi iken, şimdi iki yönlü bir hayat yaşamaya başlamıştı. Bir yandan sırf meteorolojiyi konu alan makaleler yazmaktaydı. Diğer yandan sırf matematiği konu alan makaleler de yazıyor, ancak insanları biraz yanıltacak şekilde bunların önsözünde meteorolojiden bahsediyordu. Sonraları bu önsözler de tamamen kaybolacaktır.

Lorenz dikkatini artık iyiden iyiye, hiçbir zaman kararlılığa erişemeyen sistemlerin matematiğine çevirmişti; bunlar öyle sistemlerdi ki hep tekerrür etmeye gayret göstermekle birlikte bunu hemen hemen hiç başaramamışlardı. Havanın da böyle aperiyodik bir sistem olduğunu herkes biliyordu. Doğa, neredeyse düzenli bir şekilde çoğalan ve azalan hayvan popülasyonları gibi; insanlara işkence edercesine adeta bir düzene benzer periyotlarla gelip giden salgın hastalıklar gibi bunun daha birçok örnekleriyle doludur. Hava, esintileriyle, bulutlarıyla daha önce bulunduğu bir durumun tamamen aynı bir duruma tekrar gelecek olsa muhtemelen bundan böyle sonsuza dek kendini tekrarlar; hava durumunu tahmin sorununun da artık beş paralık değeri kalmazdı.

Lorenz hava olaylarının kendilerini tekrarlama konusundaki isteksizliği ile meteoroloji uzmanlarının hava durumunu tahmin etmekteki beceriksizlikleri arasında bir ilişki (yani aperiyodiklik ile öngörülemezlik arasında bir ilişki) olması gerektiğini fark etti.[18] Araştırdığı aperiyodikliği meydana getirecek basit denklemleri bulmak pek o kadar kolay olma-

dı. Bilgisayarı ilk başlarda aynı işlemleri tekrar tekrar çevirmek suretiyle kilitlenme eğilimine girdi. Ancak Lorenz değişik türde küçük komplikasyonlar üzerinde deneylerini sürdürerek sonunda istediğini elde etti: Kurduğu bir denklemle doğudan batıya doğru sıcaklık miktarını değiştirerek, güneşin mesela, Kuzey Amerika'nın doğu sahillerini ısıtması ile Atlantik Okyanusunu ısıtması arasında gerçekte meydana gelen değişime tekabül eden değerleri bulmayı başardı. Tekrarlar ortadan kalktı.

Kelebek Etkisi tesadüfen ortaya çıkan bir olay değildi: Olmasında zaruret bulunan bir olaydı. Lorenz şöyle bir mantık yürütmüştü: Atmosferdeki küçük pertürbasyonların azarak sistemin içinde şiddetini arttırması yerine küçük boyutlarda kaldıklarını düşünelim. O zaman, hava, daha önce geçtiği bir durumun ihtiyari olarak yakınına geldiği takdirde, o durumu izlemiş bulunan şekillerin de ihtiyari olarak yakınında *kalacaktır*. Uygulamada, bu çevrimleri öngörmek mümkün olacaktı, başka bir deyişle ilginç tarafı kalmayacaktı. İnsan arasa dünyanın gerçek hava durumuna ilişkin zengin bir repertuarı, meteorolojinin o güzel çok yönlülüğünü meydana getirmek için, Kelebek Etkisinden daha iyi bir olay bulamazdı.

Kelebek Etkisine bir de teknik isim verildi: Başlangıç durumundaki şartlara hassas bağımlılık. Ancak başlangıç durumuna hassas bağımlılık yeni bir kavram değildi. Halk ağzında bile bunun yeri vardı:

"Bir mıh bir nal kurtarır;
Bir nal bir at kurtarır;
Bir at bir er kurtarır;
Bir er bir cenk kurtarır;
Bir cenk bir vatan kurtarır!" [19]

Gerçek hayatta olduğu gibi bilimde de, birtakım zincirleme olaylarda küçük değişiklikleri büyük sorunlar haline getiren bir kriz noktası bulunduğu bilinir. Kaos ise bu noktaların her yerde olduğu anlamına geliyordu. Noktalar her yerde hazır bulunuyordu. Hava gibi sistemlerin içinde, başlangıç

durumundaki şartlara hassas bağımlılık küçük ölçekli olayların büyük ölçekli olaylarla iç içe giriş biçiminin kaçınılması imkânsız bir sonucuydu.

Lorenz'in hem aperiyodikliği hem de başlangıç durumuna hassas bağımlılığı meteoroloji oyununda canlandırmasına bütün arkadaşları şaşakalmışlardı: On iki denklem durup dinlenmeksizin, makinelere özgü soğuk bir etkinlik çerçevesinde hesaplanmaya devam ediyordu. Böylesine basit bir determinist sistemden bu kadar zenginlik, bu kadar öngörülemezlik (yani kaos) nasıl doğabiliyordu?

Lorenz meteorolojiyi bir kenara bırakıp bu kompleks davranış biçimini meydana getirmek için daha da basit usuller aramaya başladı. Sadece üç denklemden oluşan bir sistemde böyle bir yol buldu. Bu denklemler lineer değildi, yani tanımladıkları ilişkilerin birbirlerine orantılı olmaları gerekmemekteydi. Lineer ilişkileri bir grafik üzerindeki bir doğru ile ifade etmek mümkündür. Lineer ilişkilerin mantığını anlamak da kolaydır: *Ne kadar artarsa o kadar daha neşeli olur.* Lineer denklemlerin çözümleri vardır, bu yüzden ders kitapları için en uygun malzemeyi teşkil eder. Lineer sistemlerin modüler olma özelliği de yabana atılacak cinsten değildir: Bu sistemleri parçalara ayırabilirsiniz, sonra da tekrar bir araya getirebilirsiniz - parçaları birbirine ekleyebilirsiniz.

Nonlineer sistemler genellikle çözüme elverişli değildir; bir araya da getirilemez. Akışkan sistemlerde ve mekanik sistemlerde, nonlineer şartlar, genellikle insanların konuyu basite indirip kolayca anlaşılır hale getirmek istedikleri zaman, devre dışı bırakmak istedikleri özellikler arasında sayılır. Mesela sürtünme. Sürtünme olmasaydı sizin bir hokey topuna ivme kazandırmak için gerek duyduğunuz enerji miktarı basit bir lineer denklemle ifade edilebilirdi. Sürtünme işin içine girince bu ilişki karmaşık hale gelir, çünkü enerji miktarı topun halen kazanmış bulunduğu hıza bağlı olarak değişir. Nonlineerlik demek, belirli bir oyunu oynarken kuralları değiştirmenin de bir usulü vardır, demektir. Sürtünmeye sabit bir değer yükleyemezsiniz, çünkü sürtünmenin değeri hıza bağlıdır. Buna karşılık, hız da sürtünme-

ye bağlıdır. Bu çarpıtılmış değişebilme niteliği nonlineerliğin hesaplanmasını zorlaştırmakta; aynı zamanda da lineer sistemlerde hiçbir zaman bulunmayan bir davranış biçimi zenginliği yaratmaktadır. Akışkanlar dinamiğinde her şey dönüp dolaşıp tek ve şaşmaz bir denkleme indirgenir, bu da Navier-Stokes denklemidir. Bir akışkanın hızını, basıncını, yoğunluğunu ve viskozitesini bundan daha kısa ve özlü bir şekilde ifade etmenin imkânı yoktur; ne var ki bu da nonlineer bir denklemdir. Bundan dolayı bu gibi ilişkilerin doğasını keşfedip tanımlamak çoğunlukla mümkün olmamaktadır. Navier-Stokes denklemi gibi nonlineer bir denklemin davranış biçimini analiz etmek bir lâbirentte gezinmeye benzer; ama bunu öyle bir lâbirent olarak düşünmek lazımdır ki, içindeki duvarlar sizin attığınız her adıma göre şekil değiştirmektedirler. Bizzat Von Neumann da bunu şöyle izah etmiştir: "Denklemin karakteri[20] . . . bütün özellikleri itibariyle eş anlı olarak değişime uğramaktadır.: Hem düzeni hem de derecesi değişmektedir. Bu yüzden, matematikte çok kötü güçlüklerle karşılaşmaya hazır olmalısınız." Navier-Stokes denkleminin bünyesinde nonlineerlik gibi bir ucube barınmış olmasaydı yaşadığımız dünya bambaşka bir âlem olurdu - bilimin de kaosa ihtiyacı kalmazdı.

Akışkan cisimlerdeki hareketin özel bir türü Lorenz'in üç denklemine ilham kaynağı olmuştur: Sıcak gazların ya da sıvıların yukarı çıkması, yani konveksiyon adıyla bilinen olay. Konveksiyon güneşin kızdırdığı topraklara değip ısınan havayı atmosferde karıştırır; pırıl pırıl konveksiyon dalgaları da kızgın asfaltın ve kızgın radyatörlerin üstünde hayalete benzer şekillerle yükselir. Lorenz bir fincan sıcak kahvenin içindeki konveksiyondan bahsederken de aynı zevki duymaktaydı.[21] Bu olaya kendine göre bir açıklama getiriyor ve bunun, gelecekteki davranış biçimleri hakkında öngörüler yapmak istediğimiz evrenimizdeki sayısı bilinemeyecek kadar çok olan hidrodinamik proseslerden sadece biri olduğunu söylüyordu. Fincandaki kahvenin ne kadar hızla soğuyacağını nasıl hesaplayabiliriz? Kahve sadece sıcaksa hiçbir hidrodinamik hareket olmaksızın sıcaklığı dağılıp kaybo-

lacaktır. Kahve sabit bir durumda kalacaktır. Ama kahve yeteri kadar kaynar sıcaklıktaysa fincanın dibindeki sıcak kahve konvektif bir ters dönüşle daha soğuk olan yüzeye doğru çıkacaktır. Kahvedeki konveksiyonu fincana biraz süt damlatarak açıkça görmek mümkündür. Kahvedeki daireler karmaşık olabilir. Ancak böyle bir sistemin uzun süreli akıbeti açık ve seçik olarak bellidir. Sıcaklık sönümlü olduğu, ayrıca, sürtünme, hareket eden bir akışkan cismi yavaşlattığı için, bu hareket, önlenmesi mümkün olmayan bir duruş pozisyonuna gelmek zorundadır. Lorenz bilimsel bir toplantıda, biraz da istihza ile şöyle demiştir: "Kahvenin sıcaklık durumunu bir dakika öncesinde tahmin etmek bakımından epeyi sıkıntı çekebiliriz, fakat sıcaklığının ne olacağını bir saat öncesinden öngörmekte pek güçlük çekmememiz gerekir."[22] Soğuyan bir fincan kahveye hükmeden hareket denklemleri o sistemin akıbetini yansıtmak durumundadır. Bu denklemler sönümlü olmak zorundadır. Kahvenin sıcaklığı odanın sıcaklığına doğru yönelmeye, hızı da sıfıra doğru yönelmeye mecburdur.

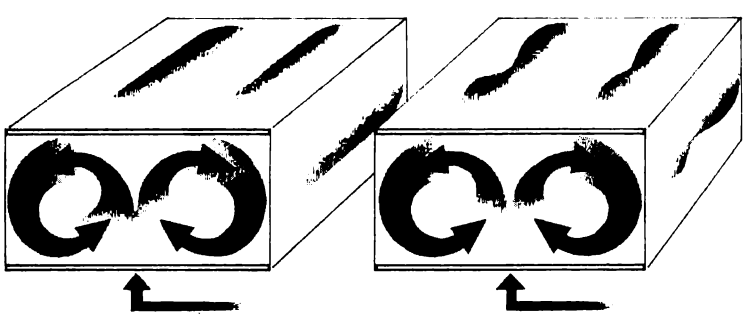
Lorenz konveksiyonla ilgili bir denklem kümesini almış;[23] bunları, içlerinde var olup dışsal sayılabilecek her türlü unsurdan tamamen ayıklayarak adeta gerçekdışı bir sadeliğe indirgemiştir. Orijinal modelden geriye hemen hemen hiçbir şey bırakmamış, ancak nonlineerliği muhafaza etmiştir. Fizikçi gözüyle bakıldığı takdirde, denklemler kolay görünüyordu. O kadar ki, bunlara şöyle bir bakıp (nitekim daha sonraki yıllarda birçok bilim adamı öyle yapmıştır) *bunu ben de çözerim* diyebilirdiniz.

Lorenz, sakin sakin, "Evet" diyordu, "bunları gördüğünüzde öyle düşünmek insana normal gelmektedir. Bunlar birtakım nonlineer diziler içermektedir, siz bunları da aşmanın mutlaka bir yolunun bulunduğunu düşünürsünüz. Ancak bulmanız mümkün değildir."

Ders kitaplarındaki en basit türden konveksiyon, içinde akışkan bir cisim bulunan, dibi ısıtılabilecek şekilde düz, tepesi de soğutulabilecek şekilde düz bir kutuda yer almaktadır. Kutunun sıcak tabanı ile soğuk tavanı arasındaki sıcak-

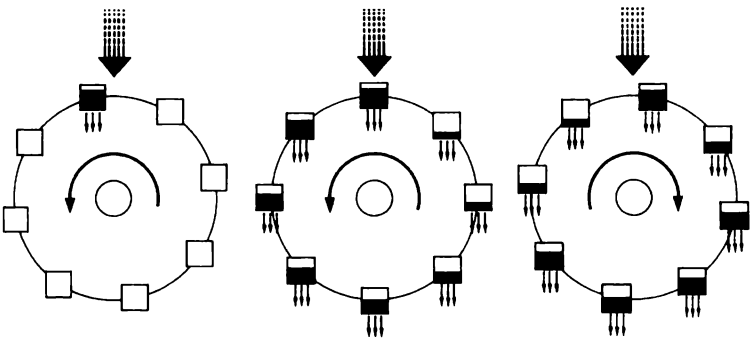
lık farkı akışı kontrol etmektedir. Fark az ise sistem hareketsiz kalır. Sıcaklık bir metal çubukta olduğu gibi, iletim yoluyla tepeye doğru hareket ederken akışkanın doğal olarak hareketsiz kalma eğiliminin gerçekleşmesini engellemez. Üstelik, sistem de istikrarlıdır. Mesela, deneyde görev alan doktora öğrencilerinden biri cihaza çarptığı zaman meydana gelebilecek gelişigüzel hareketler de yok olmak eğiliminde olacak ve sistem yeniden kendi kararlı durumuna dönecektir.

Ancak, ısı artırıldığı takdirde yeni bir davranış biçimi oluşacaktır. Alttaki akışkan daha sıcak hale geldikçe genleşecektir. Genleştikçe yoğunluğu azalacaktır. Yoğunluğu azaldıkça daha hafifleşecek, o kadar hafif hale gelecektir ki sürtünmeyi aşarak yüzeye doğru yükselecektir. Şayet kutunun tasarımında titiz davranılmışsa içinde silindir biçiminde bir rulo oluşacak, bu rulonun bir kenarı boyunca sıcak akışkan yükselirken diğer kenarı boyunca da soğuk akışkan aşağıya çökecektir. Yandan bakıldığında, hareket sürekli bir daire biçiminde görünmektedir. Laboratuvar dışında da, ta-



BİR AKIŞKANIN SARMALLAŞMASI. Bir sıvı veya bir gaz alttan ısıtıldığında, akışkan cisim silindir şeklinde sarmallara dönüşme eğilimine girer (soldaki resim). Isınmış akışkan bir taraftan yükselir, ısı kaybeder ve diğer taraftan iner - bu konveksiyon sürecidir. Isı daha arttırıldığında (sağdaki resim) sisteme istikrarsızlık unsuru girer ve silindirlerin bir başından öbür başına ileri geri hareket eden bir titreşim oluşur. Sıcaklığın daha da yüksek olması halinde akımda hiç düzen kalmamakta ve çalkantılı bir hale gelmektedir.

biatın kendi konveksiyon hücrelerini oluşturduğu birçok olaylar vardır. Mesela, güneş bir çölün yüzeyini ısıttığında,



LORENZ'İN SU TEKERLEĞİ. Edward Lorenz'in ilk olarak keşfettiği meşhur kaos sistemi aynen su tekerleği denen bir mekanik cihaza benzer. Bu basit cihaz akıllara durgunluk verecek kadar komplike davranış biçimleri gösterme yeteneğine sahiptir.

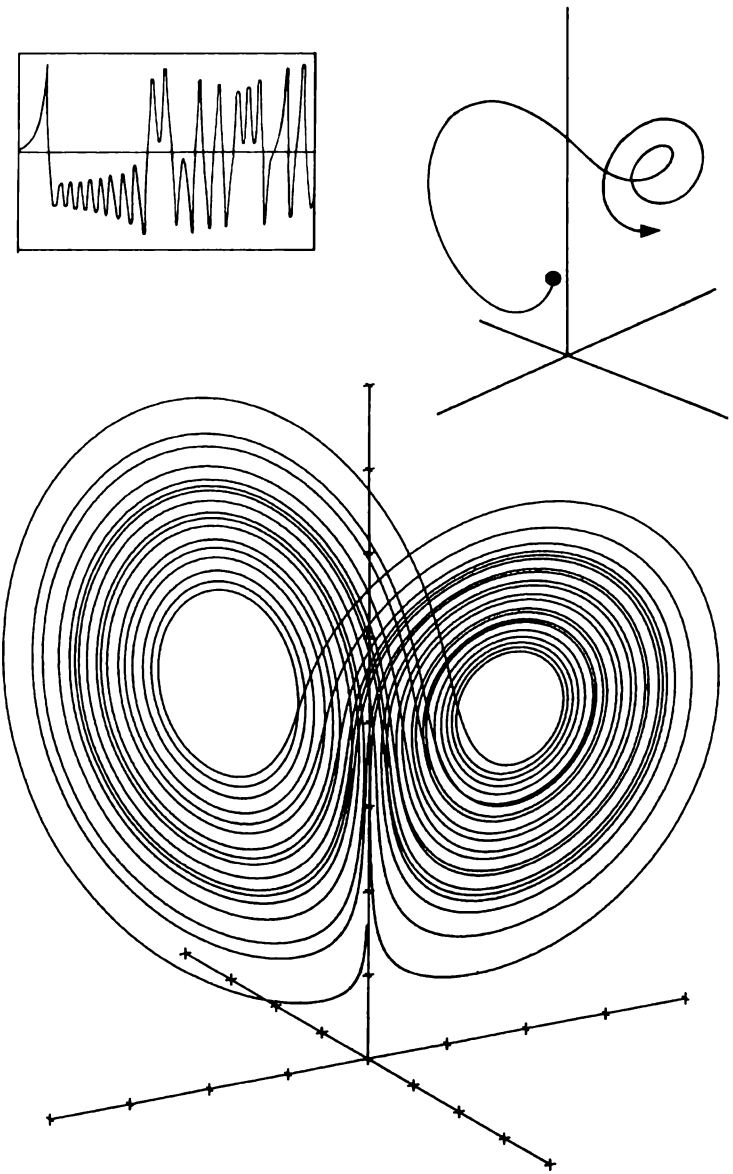
Su tekerleğinin dönüşü, konveksiyon prosesinde dönen akışkan cisim silindirlerinin özelliklerinden bazılarıyla aynı özellikleri göstermektedir. Su tekerleği silindirden kesilmiş bir dilime benzer. İki sistem de, su ya da ısı ile, düzenli bir şekilde hareket ettirilmekte, ikisi de enerjiyi sönüme götürmektedir. Akışkan cisim ısı kaybetmekte; kovalar ise su kaybetmektedir. İki sistemin uzun süreli davranış biçimleri de hareketi veren enerjinin gücüne bağlıdır.

Su, tepeden düzenli bir tempo ile akmaktadır. Suyun tekerleğe akışı yavaş ise tepedeki kova hiçbir zaman yeterince dolup sürtünmeyi alt edecek hale gelememekte, tekerlek de hiçbir zaman dönüşe başlamamaktadır. (Aynı şekilde, bir akışkan içinde de, ısı çok düşük düzeyde olup ağdalaşmayı altedecek hale gelemiyorsa akışkanın harekete başlamasını sağlayamayacaktır.)

Akış hızlı ise tepedeki kovanın ağırlığı tekerleği harekete geçirir (soldaki resim). Su tekerleği düzenli bir tempo ile devam eden bir dönüş hareketinde karar kılabilir (ortadaki resim).

Akışın sürati daha artarsa (sağdaki resim), sistemin bünyesinde bulunan nonlineer etkilerden dolayı dönüş hareketi kaos haline geçmektedir. Kovalar akan suyun altından geçerken içlerine ne kadar su dolacağı dönüşün hızı tarafından belirlenir. Tekerleğin dönüşü süratli ise kovaların dolmasına yetecek kadar vakit olmaz. (Aynı şekilde, hızla dönen bir konveksiyon silindirinde akışkan cisimlerin ısıyı soğurmasına yeterli vakit yoktur.) Üstelik, tekerlek hızla dönüyorsa, kovalar daha içlerindeki suyu boşaltamadan diğer tarafa yükselecektir. Bunun sonucu olarak, yukarı çıkan taraftaki ağır kovalar dönüş hareketinin yavaşlamasına, sonra da tekerleğin ters yönde dönmeye başlamasına neden olacaktır.

Gerçekten de, Lorenz, uzun dönemlerde dönüş hareketinin sık sık ters yöne döneceğini; hiçbir zaman düzenli bir tempoyla devam etmeyeceğini ve hiçbir zaman öngörülebilecek bir şekilde tekerrür etmeyeceğini keşfetmiştir.



hava yuvarlanarak yukardaki bulutlarda ya da aşağıdaki kumda gölgeli birtakım şekiller meydana getirebilmektedir.

Isıyı biraz daha arttırırsanız, davranış daha da karmaşık hale gelir. Rulolar titreşmeye başlar. Lorenz'in sadeleştirilmiş denklemleri o kadar basit hale gelmişti ki bu türden bir karmaşıklığı modellemesi imkânı kalmamıştı. Gerçek konveksiyonun özelliklerinden sadece bir tanesini ifade ediyordu: Ferris tekerleği gibi yukarı ve yanlara doğru yükselen sıcak bir akışkan cismin dairesel hareketini. Denklemler bu hareketin hızını ve ısı transferini dikkate almışlardır. Bu fiziksel prosesler karşılıklı etkileşim içindedir. Herhangi bir sıcak akışkan cismin küçük bir parçası dairenin etrafında yükselirken, soğuk akışkanla temas edecek ve böylece ısı kaybetmeye başlayacaktır. Dairenin hareket hızı yeterli ise akışkan madde topu tepeye ulaştığı ve rulonun diğer kenarı boyunca aşağıya inişe geçtiği ana kadar içindeki ekstra ısının tamamını kaybetmeyecek, böylelikle gerçekte, arkasından gelen diğer sıcak akışkanın momentumu yönünde bastırmaya başlayacaktır.

Lorenz sistemi konveksiyonu tamamen modelleyememiş olsa da gerçek sistemlerden hiç farkı olmayan benzerlikleri de içeriyordu. Bir örnek vermek gerekirse Lorenz'in denklemleri, modern jeneratörlerin atası olan eski model bir elektrik dina-

LORENZ ÇEKİCİSİ (yan sayfada). Baykuş gözlerini ya da kelebek kanatlarını andıran bu sihirli şekil kaosun ilk kâşifleri tarafından bir sembol olarak benimsenmiştir. Düzensiz bir veri akışının içinde sağlam ve güzel bir yapının saklı bulunduğu bu şekil sayesinde açıklanmış olmaktadır. Normal olarak, herhangi bir değişkenin değerlerindeki değişmeler sözde zaman dizileri denen kümelerle ortaya konabilmektedir (üstteki şekil). Üç değişken arasındaki ilişkilerin değişmelerini göstermek için daha farklı bir tekniğe ihtiyaç vardır. Bu üç değişken, bir noktanın zaman içinde herhangi bir anda üç boyutlu uzay içinde bulunduğu yeri tespit etmekte, adreslemektedir; sistem değiştikçe, devamlı surette değişen değişkenler de noktanın hareketiyle ifade edilmektedir.

Sistem hiçbir zaman aynen tekerrür etmediği için, yörünge kendi kendisiyle asla kesişmez. Tam tersine sonsuza kadar kendi etrafında sarılmaya devam eder. Çekici üzerindeki bu hareket soyut olmasına rağmen, gerçek sistemin hareketi hakkında bir fikir vermektedir. Burada bir örnek vermek gerekirse çekicinin bir kanadından diğer kanadına geçiş su tekerleğinin ya da konveksiyon halindeki akışkanın dönüş hareketinin ters yöne dönmesine tekabül etmektedir.

mosunu tam bir hassaslıkla öyle bir tanımlamıştır ki, bu dinamoda akımlar bir manyetik alanda dönen bir diskin içinde dolaşım yapmaktadır. Bazı şartların gerçekleşmesi halinde dinamo tersine çalışabilmektedir. Lorenz'in denklemleri tanındıktan sonra, bazı bilim adamları böyle bir dinamonun davranış biçimi sayesinde, çok özelliği olan bir başka inversiyon olayına da açıklama getirilebileceği düşüncesini ortaya attılar: bu olay Yer'in manyetik alanıydı. Yeryüzü tarihinde, "jeodinamo" nun[24] dengesinin, ne tarafa yöneleceği belli olmayan ve izah edilmesi imkânsız fasılalarla bozulduğu bilinmektedir. Böyle bir düzensizlik karşısında, teorik fizikçiler olayın izahını genellikle sistemin dışında arayıp mesela göktaşı çarpması gibi nedenlere bağlamak eğilimindedirler. Oysa, belki jeodinamonun da kendi kaosu vardır.

Lorenz denklemlerinin hassas bir şekilde tanımladığı bir diğer sistem bir tür su tekerleği,[25] dönen konveksiyon dairesinin mekanik bir benzeridir. En tepesinde, tekerleğin kenarına asılı bulunan kapların içine düzenli bir şekilde su damlamaktadır. Her kabın içindeki su, küçük bir delikten düzenli bir şekilde kaçmaktadır. Suyun akıntısı yavaş ise yukardaki kaplar hiçbir zaman sürtünmenin etkisini yok edecek kadar hızla dolmamaktadır, akıntı daha süratli ise ağırlık tekerleği döndürmeye başlar. Rotasyonun sürekli hale gelmesi mümkündür. Yahut akıntı çok hızlı olup da ağır kaplar aşağıdan geçtikleri ve sallana sallana diğer yöne doğru yükselmeye başladıkları sırada tekerlek yavaşlayacak, duracak ve rotasyon hareketi tersine çevrilerek önce bir tarafa sonra diğer tarafa dönecektir.

Bir fizik alimi bu kadar basit bir mekanik sistemle ilgili olarak sağduyusunu dinlerse, suyun akıntısı hiç değişmediği takdirde uzun sürede sistemin hareketsiz duruma geçeceğini sezgileriyle (kaos öncesi sezgileriyle) hisseder. Tekerlek ya düzenli bir şekilde dönecek ya da düzenli bir şekilde ileri geri salınarak sabit aralıklarla önce bir yöne sonra da diğer yöne dönecektir. Lorenz ise tam aksini bulmuştur.

Üç değişkenli üç denklem bu sistemin hareketini tümüyle tanımlamıştır.[26] Lorenz'in bilgisayarı bu üç değişkenin değe-

şen değerlerinden şöyle bir döküm vermiştir: 0-10-0; 4-12-0; 9-20-0; 16-36-2; 30-66-7; 54-115-24; 93-192-74. Hayali zaman aralıkları arka arkaya beş zaman dilimlik, yüz zaman dilimlik, binlik atladıkça üçlü sayı grupları artmakta ve sonra da azalmaktadır.

Lorenz, verilerden bir resim çıkarabilmek için, üç boyutlu uzayda bir noktanın yerini belirlemek üzere üç sayılık her diziyi koordinat olarak kullanmıştır. Böylece, bu sayı gruplarından türeyen nokta grupları sürekli bir eğri çizerek sistemin davranış biçiminin kaydını çıkarmıştır. Böyle bir eğri belirli bir yere kadar ilerleyip orada duracaktır; bunun anlamı sistemin hareketsizlik durumunda karar kıldığı ve bulunulan bu durumda hız ve sıcaklık değişkenlerinin artık hiç değişmeyeceğidir. Ya da eğri devamlı halkalar çizerek dönmeye başlar ki, bunun da anlamı sistemin, kendini periyodik olarak tekrarlamak durumuna giren bir davranış şeklini benimseyip orada karar kıldığıdır.

Lorenz'in sistemi ne bunu ne de diğerini yapmıştır. Tam tersine, harita sonsuzluğa varan bir kompleksliği ortaya koymuştur. Hep belirli sınırlar içinde kalmış, sayfanın dışına taşmadığı gibi kendini hiç tekrarlamamıştır. Acayip, çok farklı bir şekil olarak bir nevi üç boyutlu çift spiral, sanki iki kanadı belli olan bir kelebek şekli çizmiştir. Bu şekle bakıldığında katıksız bir düzensizliğin işaretleri görülür, çünkü hiçbir nokta ya da noktalardan oluşmuş şeklin tekerrür ettiği görülmemiştir. Oysa, bu da yeni bir tür düzenin habercisi idi.

Yıllar sonra, fizik bilginleri Lorenz'in bu denklemlerle ilgili makalesi hakkında konuşurken "Ah, ne muhteşem makale," diye iç geçiriyorlardı. O zamanlar, sanki eski çağlardan kalmış, ebediyetin sırlarını gizleyen o eski elyazması kitaplardan birinden bahsetmekteydiler. Kaosla ilgili teknik literatürü oluşturan birlerce makale arasında "Deterministic Nonperiodic Flow" (Periyodik Olmayan Determinist Akış) kadar sözü edilen makale çok azdır. Makalenin sonunda tasvir edilen esrarengiz eğri, yani Lorenz çekicisi olarak tanınan çifte spiral gibi yıllarca resimlere hatta filmlere ilham kaynağı olan başka bir şey yoktur. Bu çekicinin söylemek istediği şeyi ilk kez

olarak Lorenz'in resimleri ortaya koyuyordu: "Bu karmaşık bir konudur." Kaosun bütün zenginliği işte oradaydı.

Bununla birlikte, o zaman, bu durumun farkına çok az kimse varabilmişti. Lorenz M.I.T.'de uygulamalı matematik profesörü ve meslektaşlarının yaptığı çalışmaları büyük bir anlayışla takdir edebilme yeteneğine sahip nazik bir bilim adamı olanWillem Malkus'a ayrıntılarıyla izahat verdi. Malkus gülüp, "Ed," dedi,[27] "Biliyoruz - hem de çok iyi biliyoruz ki - akışkanların konveksiyonu katiyen böyle bir şey yapmaz." Malkus ona bir de komplekslikten eser kalmayacağını, sistemin de düzenli, muntazam bir hareketle kararlı duruma geçeceğini söyledi.

Bundan yirmi yıl kadar sonra, "Açıkçası, o zaman bizim aklımız ermemişti," diyen Malkus, yıllar önce laboratuvarının bodrumunda Lorenz'in su tekerleğini kurarak bu işe hâlâ aklı yatmayanlara doğrusunu göstermeye çalıştığını hatırlıyordu. "Ed'in fiziğe bakış tarzı bizim bildiğimiz anlamdaki fizikten tamamen farklıydı. O, konuya bir nevi genelleştirilmiş ya da soyutlaştırılmış bir model açısından yaklaşıyordu; bu öyle bir modeldi ki, dış dünyanın görünen bazı özelliklerini yansıtan birtakım davranış biçimlerini içerdiğini Ed kendi sezgisiyle hissetmekteydi. Bununla birlikte, bunu bize tam olarak söyleyememişti. Onun bu gibi görüş ve fikirlere sahip olduğunu bizler ancak konuya girdikten sonra anlayabildik."

İşe dışardan bakan bazı kimseler, bilim camiasının kendi içinde ne kadar dar kapsamlı bir bölünmüşlük manzarası gösterdiğini fark etmiş, bilim disiplinlerini sanki zırhlı bir harp gemisinde birinden diğerine su geçmemesi için özel kapılarla ayrılmış bölmelere benzetmişlerdir. Biyologların okuyacağı o kadar çok şey vardı ki, bunun için matematik literatürünü takip etmeleri gerekmiyordu; hatta moleküler biyologlar, popülasyonlar biyolojisini bile takip etmelerine lüzum kalmadan okuyacak çok malzeme bulabiliyorlardı. Fizikçilerin de meteoroloji dergilerinin sayfaları arasında eşinmek yerine, zamanlarını daha iyi değerlendirebilecekleri işleri vardı. Matematikçilerden bazıları Lorenz'in keşfini görünce çok heyecanlandılar; aradan on yıl geçmemişti ki, fi-

zikçiler, astronomi ve biyoloji uzmanları da aynı Lorenz'in buluşu gibi bir şeyler aramaya başlamışlardı; bazen de aynı şeyi kendi alanları açısından yeniden keşfediyorlardı. Ne var ki Lorenz meteoroloji uzmanıydı; kaosu *Journal of the Atmospheric Sciences*'ın (Atmosfer Bilimleri Dergisi) 20'inci cildinin 130'uncu sayfasında aramak da hiç kimsenin aklına gelmiyordu.[28]

Devrim

Tabii ki, ne yapıp edip insanın kendini
Adına istatistik denen sıradan kümelerin
Dışına çıkarması gerek.

STEPHEN SPENDER

Bilim tarihçisi Thomas S. Kuhn,[1] 1940'lı yıllarda iki psikolog tarafından tarafından gerçekleştirilen sıkıntılı bir deneyi anlatır. Deneklere çok kısa süreyle teker teker gösterilen iskambil kartlarına bakarak bunları tanımlamaları istenmiştir. Tabii, işin için de bir de aldatmaca vardır. Kartların bazıları hilelidir: mesela, kırmızı bir maça altılısı ya da siyah bir karo kızı gibi.

Kartlar önlerinden yüksek bir hızla geçirilirken denekler hiç tereddütsüz cevap verirler. Anormallikleri katiyen fark etmezler. Kırmızı maça altılısı gösterildiğinde hepsi ya "kupa altılısı" ya da "maça altılısı" diye atılırlar. Fakat kartların gösterilme süreleri biraz daha uzatıldığında, deneklerde de birtakım tereddütler başlar. Bir sorun olduğunun farkına varmışlardır ama rahatsızlığın ne olduğunu bir türlü çıkaramazlar. Deneklerden biri bir gariplik sezdiğini, siyah bir kupanın çevresine kırmızı kenar geçirildiğini bile söyleyebilecektir.

Neticede, kartları gösterme hızı daha da yavaşladığında, deneklerin birçoğu doğru teşhisi yapmaya başlar. Yanlış kartları görecek ve oyunu hatasızca oynayabilmek üzere zihinlerinde gerekli uyarlamayı yapacaklardır. Fakat, gene de bunu hepsi yapamaz. İçlerinden bir kısmı bu şaşırtmacanın akıllarını karıştırıp kendilerine gerçekten sıkıntı vermesinden büyük rahatsızlık duyarlar. Deneklerden biri, "Kartın

cinsi her ne ise tanıyamıyorum," der.[2] "Bu sefer gördüğüm karta bile benzemiyordu. Ne rengini anlayabiliyorum ne de maça mı kupa mı olduğunu. Galiba artık maçanın bile neye benzediğinden emin değilim ben. Aman Allahım!"

Tabiatın eserlerine kısa süreli, belirsizliğe bürünmüş nazarlarla bakan profesyonel bilim adamları da aykırılık durumlarıyla karşılaştıklarında aynı diğer insanlar gibi sıkıntı ve bunalım içine düşerler. Aykırılık da, bilim adamının bakış tarzını değiştirdiği takdirde en önemli ilerlemelerin gerçekleşmesini mümkün kılmaktadır. Kuhn'un iddiası da böyledir, kaos hikâyesi de bunun böyle olduğunu anlatmaktadır.

Bilim adamlarının nasıl çalıştığı ve devrimlerin nasıl meydana geldiği konularına ilişkin olarak Kuhn, ilk defa olarak 1962 yılında kavramlarını yayınladığında bir yandan takdir kazanırken bir yandan da bir o kadar tenkit almış, neden olduğu bu tartışma da bir türlü sona ermemiştir. Kuhn, bilimin ilerlemesi için bilginin birikmesi, her buluşun kendisinden önce yapılmış buluşların en sonuncusuna ilave edilmesi ve yeni teorilerin doğması için de deneylerden çıkan yeni olguların teorileri gerekli kılması şeklindeki geleneksel anlayışın çanına ot tıkamıştır. Bilimi düzenli bir biçimde sorular sormak ve bu soruların cevabını bulmaktan ibaret bir süreç olarak gören anlayışa çomak sokmuştur. Kendi disiplinleri çerçevesindeki meşru ve iyi anlaşılmış meseleler üzerinde çalışan bilim adamlarının yaptıkları faaliyetin özü ile devrimleri yaratan istisnai, kuraldışı faaliyetler arasındaki çelişkiyi vurgulamıştır. Bilim adamlarını kusursuz rasyonel düşünceye sahip olan kimseler olarak göstermediyse bu hiç de tesadüfi değildir.

Kuhn'un şemasında, bilim normal olarak büyük ölçüde temizleme operasyonlarından ibarettir.[3] Deneyciler evvelce defalarca gerçekleştirilmiş olan deneyleri ele alıp bunların değişik versiyonlarını gerçekleştirirler.[4] Teorisyenler bir teori duvarını düzeltirken şuraya bir tuğla ilave eder, oradaki bir pervazı yeniden şekillendirirler. Zaten başka türlü olması da mümkün değildir. Her bilgin her şeye başından başlamak zorunda kalıp işe temel varsayımları sorgulamaya kalkışsa

faydalı araştırmaları yürütebilmek için teknik bakımdan gerekli olan ilerilik düzeyine erişmekte büyük sıkıntı çekeceğinde hiç şüphe yoktur. Benjamin Franklin'in zamanında,[5] elektriği anlamaya çalışan birkaç bilim adamı kendi başlangıç ilkelerini seçebilecek durumdaydılar - gerçekten seçmek zorundaydılar da. Kimi araştırıcı çekimi elektrikteki en önemli etki sayıp elektriğin, maddelerin bünyesinden kaynaklanan "çöp kokusu" gibi bir şey olduğunu düşünmüştür. Bir başkası elektriği iletken malzemelerin ilettiği akışkan bir madde zannetmiştir. Bu bilim adamları sıradan insanlarla da adeta birbirleriyle konuştukları kadar kolaylıkla konuşabiliyorlardı; çünkü inceledikleri fenomenlerle ilgili olarak, kendi bilim dallarına özgü ihtisaslaşmış bir dili, tereddüt etmeden, kendi aralarında ortaklaşa kullanabilecek bir kıvama henüz gelmiş değillerdi. Tam tersine, yirminci yüzyılda akışkan dinamiğini inceleyen bir uzman önce, kendi çalıştığı bilim dalına özgü terminolojiyi ve matematik tekniklerini kavramadığı takdirde kendi alanında bilgi geliştirmesi mümkün olmayacaktır. Buna karşılık, bilinçsiz olarak, kendi bilim dalının temellerini sorgulama özgürlüğünden de büyük ölçüde fedakârlık etmiş olacaktır.

Kuhn'un fikirlerinin merkezinde, bilim normal problem çözme kavramına dayanır; bunlar öğrencilerin ders kitaplarını ilk açtıklarında öğrendikleri cinsten problemlerdir. Bu tür problemler herkesin üzerinde mutabık kaldığı öyle başarılı bir çalışma stili tanımını ortaya koymaktadır ki, birçok bilim adamı bu stil sayesinde lisansüstü çalışmalarını yürütmüş, doktora tezini tamamlamış ve akademik kariyerin en temel gerçekliğini oluşturan bilimsel makalelerini yazmaya muvaffak olmuştur. Kuhn şöyle yazar: "Normal şartlar dahilinde bilim adamının işi yeni buluşlar yapmak değil bulmacaları çözmektir; araştırıcı, ancak mevcut bilimsel gelenek çerçevesinde tanımlanabileceğine ve çözülebileceğine inandığı bulmacalar üzerinde konsantre olur."[6]

Bir de devrimler var. Bir bilim dalında denizin tüketip karaya oturulduğu yerde yeni bir bilim doğar. Çoğunlukla devrim disiplinler arası bir niteliğe sahiptir - en hayati ke-

şifler, çoğunlukla kendi uzmanlık alanlarının normal sınırları dışına çıkıp dolaşırken kaybolan kimselerin eseridir. Bu teorisyenlerin aklına takılan problemler, genellikle araştırmadaki meşru sorgulama çizgisi içinde kabul edilen problemlerden farklıdır. Tez önerileri kabul edilmez ya da makalelerini yayınlatma girişimleri reddedilir. Bizzat teorisyenlerin kendileri de bir cevap buldukları takdirde bunun aradıkları cevap olduğunu anlayıp anlamayacaklarından emin değildirler. Meslek hayatlarını tehlikeye atmaktan çekinmezler. O kadar ki, serbestçe düşünebilmek için kendi başına çalışan, hatta araştırmalarının ne yönde ilerlediğini bile izah edemeyecek durumda olan birkaç bilim adamı yaptığı işi meslektaşlarına anlatmaya bile çekinir - Kuhn'un şemasının tam merkezine oturan bu romantik tablonun gerçek hayatta da, kaosun keşfiyle ilgili araştırmalar sırasında defalarca gerçekleştiği görülmüştür.

Kaos konusuna daha ilk başlarda eğilip araştırmaya kalkışan her bilim adamı, size ya şevkinin nasıl kırıldığını ya da kızıp nasıl sinir olduğunu anlatacaktır. Lisansüstü öğrencilerine, tezlerini henüz sınanmamış, tez danışmanlarının da uzmanlık sahibi olmadığı bir bilim dalında yazmaları halinde kariyerlerinin geleceğini tehlikeye atacakları yolunda ikazlarda bulunulmuştur. Parçacık fiziği alanında çalışan bir fizikçi bu yeni matematiğin geliştiğini öğrenince bunun ne kadar güzel bir şey olduğu, hatta hem güzel hem de zor olduğu düşüncesiyle bu matematiği kendi kendine bir oyun haline getirse bile meslektaşlarına bundan hiç bahsetmemenin daha uygun olacağına inanmıştır.[7] Daha kıdemli profesörler ise sanki bir tür orta yaş bunalımı dönemine girdikleri zehabına kapılarak meslektaşlarından birçoğunun anlamakta zorluk çekeceği ya da olumsuz düşüncelere kapılacağı bir araştırma alanında kumar oynamaya kalkışmışlardır. Fakat gerçekten yeni bir şeyi bulmuş olmanın beraberinde getirdiği bir fikri heyecanı da dolu dolu hissetmişlerdir. Kaldı ki, konunun dışında olup buna inanmış olanlar bile aynı heyecanı hissetmişlerdir. The Institute for Advanced Study'de (Yüksek Araştırmalar Enstitüsü) görevli olan

Freeman Dyson'a bakılırsa, kaos haberleri 1970'li yıllarda "elektrik çarpmış" gibi gelmiştir. Diğer bazıları da meslek hayatlarında ilk defa olarak gerçek bir paradigma değişikliğine, bir düşünce tarzının şekil değiştirmesine şahit olmanın zevkini yaşamışlardır.

Kaosu daha ilk başlarda teşhis etmiş olanlar, fikirlerini nasıl derli toplu hale getireceklerini ve bulgularını nasıl yayınlanabilir şekle koyacaklarını düşünürken beyinlerinin zonkladığını hissetmişlerdir. Araştırma çalışmaları farklı bilim dalları arasında sıkışıp kalmıştır - mesela, fizikçilerin çok soyut bulduğu konular matematikçilerin gözünde daha tamamen deney safhasında görülmüştür. Kimilerine göre, bir yandan yeni fikirleri iletmenin güç olduğuna diğer yandan geleneklere bağlı çevrelerin şiddetle karşı çıktığına bakılırsa, bu yeni bilimin bir devrim niteliğine sahip olduğu meydana çıkmaktadır. Derinliği olmayan fikirlerin özümlenmesinde zorluk yoktur; buna karşılık, insanların dünya hakkında kafalarında yaratmış oldukları imajı tazeleyip yeniden düzenlemelerini gerektiren fikirler ise nefret uyandırır. Georgia Institute of Technology'de (Georgia Teknoloji Enstitüsü) görevli olan Joseph Ford adlı bir fizikçi bu konuda Tolstoy'dan bir alıntı yaparak başlamıştır:[8] "Şu kadarını söyleyeyim ki, son derece karmaşık problemleri bile parmağının ucuyla çözebilen birçok kimseye, meslektaşlarına izah etmekten zevk aldığı, başkalarına öğretirken gurur duyduğu, bir hayat boyunca adeta iğneyle kuyu kazarak erişebildiği sonuçların meğerse yanlış olduğunu adeta gözüne sokarcasına ortaya koyduğunuzda, gerçek ne kadar basit hatta ne kadar apaçık görülüyor bile olsa bunu kolay kolay kabul edemez."

Önde gelen fizikçilerin birçoğu yeni doğan bu bilimin varlığından pek fazla haberdar görünmediler. Aralarından özellikle geleneksel akışkanlar dinamiği alanında çalışan bazıları, açıkça karşı çıkıp mücadeleye giriştiler. Birincisi, kaos adı altında öne sürülen tezlerin bir keşmekeşi ortaya koyduğu ve bilimsel niteliği olmadığı görüşündeydiler. Üstelik kaosun bütün dayanağı konvansiyonel olmayan, zor bir matematikten ibaret görünüyordu.

Kaos uzmanları çoğaldıkça Üniversitelerin bazı bölümleri ana yoldan kopan bu bilginlerin gidişatını onaylamadıklarını gösterdiler; bazıları daha da ileri gidip birtakım ağır şartlar koydular. Bazı dergiler kaos hakkında makaleler sunulmasına karşı uygulanmak üzere yazılı olmayan kurallar getirdiler; diğer bazı dergiler ise ortaya çıkıp sayfalarını sadece kaosa açtılar. Kaosçular, kaotisyenler veya kaologlar (böyle yeni isimler duyabiliyordunuz)[9] her yıl verilen önemli ödüller ve burslar listelerinde çeşitli zamanlarda boy göstermeye başladılar. 1980'li yılların ortalarına gelindiğinde akademik düzeydeki yayım süreci sayesinde, kaos uzmanları üniversitelerin yönetim kademelerinin önemli pozisyonlarında görev yapar hale gelmişlerdi. "Nonlineer dinamik" ve "kompleks sistemler" üzerinde ihtisaslaşmayı sağlamak üzere bazı yeni merkezler ve enstitüler kuruluyordu.

Kaos sadece bir teori olmaktan öteye aynı zamanda bir yöntem olmuş; sadece bir düşünce sistemi olmakla kalmayıp bilim yapmanın bir yolu haline de gelmişti. Kaos bilgisayar kullanımında kendi tekniğini de geliştirmişti; bu öyle bir teknikti ki Cray'lerin ve Cyber'lerin müthiş hızına ihtiyaç duymuyor, esnek etkileşimi gerçekleştirmeye uygun olan alçakgönüllü terminalleri tercih ediyordu. Kaos araştırıcılarına göre, matematik deneysel bir bilim haline gelmiş; bu çerçevede deneme tüpleri ve mikroskoplarla dolu olan laboratuvarların yerini bilgisayarlar almıştı. Bu araştırmalarda kilit unsur grafik çizgileriydi. Kaos uzmanlarından birinin dediği gibi, "Matematikçinin resim kullanmadan çalışması kendine eziyet etmekten başka bir şey değildir".[10] "Şu hareketle ötekisi arasındaki ilişkiyi nasıl görebilirler? Sezgilerini nasıl geliştirebilirler?" Bazıları çalışmalarını sürdürürken bunun bir devrim olduğunu açık ve seçik olarak reddeder; diğer bazıları ise şahit oldukları değişiklikleri tanımlarken Kuhn'un paradigma değişmelerini açıklarken kullandığı sözlüğe hiç çekinmeden başvururlar.

Üslup bakımından incelendiğinde, kaosla ilgili olarak yayınlanan ilk makalelerde Benjamin Franklin zamanının ilk prensiplere kadar geri giden döneminin havasını bulmak

mümkündür. Kuhn'un da işaret ettiği gibi, yerleşik bilim geleneklerinde, sorgulama için herkesin aynı çıkış noktası olarak kullanacağı bir bilgi kümesi tartışmaksızın var kabul edilir. Bilim adamları, meslektaşlarının canı sıkılmasın diye, makalelerine genellikle başkalarının anlayamayacağı kendi özel sözleriyle başlayıp gene bunlarla bitirirler. Buna karşılık, 1970'li yılların sonlarından itibaren kaos hakkında yayınlanan makaleler, önsözlerinden başlayarak sonuç bölümlerine kadar adeta İncilden sayfalar okunuyormuş hissini vermiştir. Bu makalelerde sanki imanın yepyeni birtakım unsurları ortaya atılmakta, sonunda da çoğunlukla, insanlar bir şeyler yapmaya davet olunmaktadır. *Bu sonuçlar bize hem çok heyecan verici hem de teşvik edici nitelikte görünmektedir.* [11] *Türbülans haline geçiş dönemiyle ilgili olarak teorik bir tablo su yüzüne çıkmaya başlamış bulunmaktadır. Kaosun özüne ulaşmak matematiksel olarak mümkündür.*[12] *Kaos bugün öyle bir gelecek öngörmektedir ki bunu kimsenin reddetmesine imkân yoktur.*[13] *Ancak geleceği kabul edebilmek için insan geçmişinin büyük bir kısmından vazgeçmek zorundadır.*

Yepyeni ümitler, yepyeni üsluplar ve en önemlisi, yepyeni bir bakış tarzı. Devrimler bölük pörçük gelmez.[14] Eski köye yeni âdetler gelir, eski sorunlara yeni bir gözlük takılarak bakılır; diğer sorunlar ise ilk defa teşhis olunur. Ortaya çıkan durum, bütün bir sanayi sektörünün yepyeni bir üretim için yeniden yapılanmasına benzer. Kuhn bu durumu tasvir etmek için, "Sanki, profesyonel bilim adamları topluluğunun, buradan aniden alınıp bambaşka bir gezegene götürüldüklerini, orada, eskiden bilip tanıdıkları nesneleri dünyadakinden farklı bir ışık altında gördüklerini, hatta o nesnelerin yanı sıra bilip tanımadıkları nesnelerle de karşılaştıklarını düşünebilirsiniz,"[15] şeklinde izah etmiştir.

Her laboratuvarın bir faresi olduğu gibi,[16] bu laboratuvarınki de bir sarkaçtı: klasik mekaniğin sembolü, tahdit edilmiş hareketin nümunesi, saat dakikliğinin timsali sarkaç. Bir kütle bir çubuğun ucuna takılmış serbestçe sallanmaktadır. Türbülansın keşmekeşinden kaçırıp daha uzağa götürebileceğiniz başka ne olabilir ki?

Arşimed'in içinde yıkandığı leğeni ve Newton'un elması gibi, Galileo için de anlatılan bir efsane vardır; genellikle herkesin bildiği fakat biraz şüphe götürür yanı olan bu efsaneye göre, Galileo'nun bir kilise şamdanı vardı; ileri geri, durmadan, dinlenmeden, tekrar tekrar yeniden salladığı bu şamdanın verdiği mesaj monoton bir şekilde Galileo'nun zihninde yer ediyordu. Christian Huygens sarkacın hareketinin öngörülebilirliğini değerlendirip bunu zamanı ifade etmek için kullanılan bir araç haline dönüştürdü, böylece Batı medeniyetini artık dönüşü olmayan bir yola soktu. Foucault, Paris'teki Panthéon'da yirmi katlı bir apartman yüksekliğindeki bir sarkacı kullanarak dünyanın döndüğünü ispatladı. Her duvar, masa ve kol saatinin (titreşen kuvars çağına gelinceye kadar) çalışmasının esası, belirli bir boy ve şekildeki bir sarkaçtan ibaret oldu. (Bu bakımdan kuvarsın salınımı da pek farklı sayılmaz.) Uzayda sürtünme olmadığı için, periyodik hareket kaynağını gök cisimlerinin yörüngelerinden alır; buna karşılık dünya üzerindeki hemen her türlü düzenli salınımda sarkaç ailesinden birisinin rolü vardır. Temel elektronik devrelerin tanımlanmasında kullanılan denklemler, sallanan bir ağırlığı tanımlamakta kullanılan denklemlerin aynıdır. Elektronik salınımlar miyonlarca kat daha hızlıdır, fakat bunların tabi olduğu fizik de aynıdır. Oysa, yirminci yüzyıla kadar klasik mekaniği okullardan başka yerde ve rutin mühendislik projeleri dışında görmek imkânı yoktu. Sarkaçlar bilim müzelerini süsler; hava alanlarındaki hediyelik eşya mağazalarına da ekseni üzerinde dönen plastik "uzay topları" şeklinde canlılık getirirdi. Hiçbir fizikçinin sarkaçlara ilgi gösterdiği görülmemiştir.

Oysa, sarkacın daha çok numarası vardı. Aynı Galileo devrimi sırasında olduğu gibi, mihenk taşı haline geldi. Aristoteles sarkaca baktığında[17] yere doğru gitmeye çalışan fakat bağlı olduğu ipin zorlamasından dolayı ileri geri şiddetle sallanan bir ağırlık olarak görüyordu. Modern görüş açısından bu açıklama saçmalıktan başka bir şey değildir. Hareket, atalet ve yer çekimi gibi klasik kavramları esas kabul eden bir insana, Aristoteles'in sarkaç kavramını anlayış

ve açıklama tarzına gayet uygun düşen kendi içinde tutarlı bir dünya görüşünü takdir etmek çok ters gelecektir. Aristoteles'e göre, fiziksel hareket bir miktar ya da bir kuvvet olmayıp bir cins bir değişmeydi; aynen bir insanın büyümesinin bir nevi bir değişme olması gibi. Düşen bir ağırlığın yapmak istediği şey sadece en doğal haline, yani kendi kendine bırakılırsa ulaşacağı hale erişmektir. Bu bağlamda, Aristoteles'in görüşünün bir mantığı vardı. Diğer taraftan, Galileo sarkaca baktığında ölçülmesi mümkün olan bir düzenlilik görüyordu. Bunu izah etmek için, hareket halindeki cisimlerin anlaşılması konusunda bir devrim yapılması ihtiyacı duyuldu. Galileo'nun eski Yunanlılara üstünlüğünün sebebi daha iyi verilere sahip olması değildi. Tam tersine, sarkacın süresini hassas bir şekilde tespit etme fikri, aslında bazı arkadaşlarını toplayıp yirmi dört saatlik bir devre zarfındaki salınımları saymak gibi emek yoğun bir deneyden ibaretti. Galileo'nun bu düzenliliği fark etmesinin temelinde bunu zaten öngören bir teoriye sahip bulunması yatıyordu. Aritoteles'in anlayamadığı şeyi Galileo anladı: Hareket eden bir cisim harekete devam etme eğilimindedir, hızında ya da yönünde meydana gelecek bir değişiklik ancak bir dış kuvvetle, mesela sürtünme ile açıklanabilir.

Gerçekte, Galileo'nun teorisi o kadar güçlüydü ki aslında *mevcut olmayan* bir düzenliliği görmüştü. Belirli bir uzunluğu olan bir sarkacın, salınım açısı ister geniş ister dar olsun yalnızca doğru zamanı göstermekle kalmayıp aynı zamanda salındığını da öne sürdü. Geniş salınımlı bir sarkacın katedeceği yol daha uzun olmakla birlikte, aynı sürede salınabilmesini sağlayacak kadar daha hızlı yol almaktadır. Başka bir ifadeyle, sarkacın periyodu genliğine bağlı değildir. "İki arkadaş oturup salınımları saymaya başlasalar biri geniş olanları diğeri de dar olanları saysa onlarcasını hatta yüzlercesini saydıktan sonra buldukları sayıda ne tek bir salınım ne de bir salınımın kesri kadar bile fark olmadığını göreceklerdir."[18] Galileo böylece iddiasını deney sonucu olarak ortaya koymuştu, fakat teori bu iddiayı o kadar ikna edici hale getirdi ki bugün bile lise düzeyindeki birçok fizik der-

sinde hâlâ Tanrı kelâmı gibi okutulmaktadır. Ama aslında yanlıştır. Galileo'nun tespit ettiği düzenlilik sadece bir yaklaşıklıktır. Ağırlığın hareketindeki değişme açısı denklemlerde küçük bir nonlineerlik yaratır. Genliğin düşük olduğu durumlarda neredeyse hata yok denebilir. Fakat, gerçekte yok değildir, vardır; hatta Galileo'nun tanımladığı deney kadar ilkel bir deneyle bile ölçülmesi mümkündür.

Küçük nonlineerlikleri ihmal etmek insanlara zor gelmiyordu. Deneylerle uğraşan insanlar yaşadıkları dünyanın mükemmel olmadığını çok çabuk öğrenirler. Galileo ve Newton'dan bu yana geçen yüzyıllarda, deneylerde düzenliliği araştırmak bilim adamlarının asıl uğraşını teşkil etmiştir. Her deneyci aynı kalan miktarları ya da sıfır olan miktarları arar. Bunun anlamı da net bir resme karışıp dağınıklık yaratan minik unsurları dikkate almamak demektir. Bir kimyacı bulduğu iki madde arasındaki oranın ilk gün 2.001, ertesi gün 2.003, daha sonraki gün de 1.998 olduğunu görse hiç kusursuz bir bir-bölü-ikilik oranın mevcudiyetini açıklayan bir teorinin peşine düşmediği takdirde enayi sayılır.

Galileo, aradığı net sonuçları ele edebilmek için varlığını bildiği sürtünme ve hava direnci gibi nonlineerlikleri de nazarı itibara almamak zorunda kalmıştı. Havanın direnci herkesin iyi bildiği ve deneylerin canına okuyan bir komplikasyon olduğundan, bu yeni mekanik biliminin özünü kavrayabilmek için ayıklanıp devre dışı bırakılması gerekiyordu. Bir tüy bir taş kadar hızla düşer mi? Düşen cisimlerle ilgili olarak yapılan bütün deneyler bunun aksini söyler. Elindeki topları Pisa kulesinden aşağı bırakan Galileo'nun hikâyesi, bir efsane havasına bürünmüş de olsa düzenlilikler ile deneydeki düzensizliğin birbirinden ayrılabileceği ideal bir bilim dünyası icat etmek suretiyle sezgileri *değiştirmenin* hikâyesidir.

Yer çekiminin belirli bir kütle üzerindeki etkilerini havanın direncinden ayırmak fikir düzeyinde gerçekleştirilen müthiş parlak bir başarıdır. Bu deney Galileo'ya atalet ve momentin özüne inebilme imkânını sağlamıştır. Gerçek dünyada, sarkaçlar hâlâ sonuçta tam olarak Aristoteles'in

emektar paradigmasının öngördüğü şekilde davranırlar. Duruşa geçerler.

Fizikçiler, bir sonraki paradigma değişikliğine zemin hazırlayacak temel çalışmaları yaparken öyle birtakım olaylarla karşılaşmaya başlamışlardır ki, birçok kimse bunları sarkaçlar gibi basit sistemler hakkında kendilerine öğretilenlerin yetersizliği olarak görmüştür. İçinde yaşadığımız yüzyıla kadar, sürtünme gibi sönümlü süreçler teşhis edilmiş, öğrenciler de bunları denklemlerine dahil etmeyi öğrenmişlerdi. Öğrenciler, aynı zamanda, nonlineer sistemlerin genellikle çözümü bulunmadığını öğrenmişlerdi ki, bu doğruydu - bunların istisna teşkil ettiğini de öğrenmişlerdi ki işte bu doğru değildi. Klasik mekanik bilgisi hareket eden cisim türlerinin, sarkaçlar ve çifte sarkaçların, helezoni yayların ve zembereklerin, çekme ve bükme yayların davranış biçimlerini izah etmiştir. Matematik akışkan sistemlerle elektrik sistemlerinde tatbik alanı bulmuştur. Ancak, klasik fiziğin hâkim olduğu dönemde hiç kimse, nonlineerliğe hakkı olan değer verildiği takdirde kaosun dinamik sistemlerin bünyesinde gizlendiğinden şüphelenmemiştir.

Sarkaçları kavramış olmayan fizikçilerin (üstelik bunları yirminci yüzyılın ilk yarısında kavranması mümkün olmayan bir şekilde anlamış olmadıkça) türbülansı ya da karmaşklığı anlamaları da doğrusu mümkün değildir. Kaos birbirinden farklı sistemlerin incelenmesinde birlik ve beraberlik sağlamaya başladıkça sarkaç dinamiğinin alanı da, lazerlerden süper iletkenli Josephson eklemlerine kadar uzanan bir ileri teknoloji yelpazesini kapsayacak şekilde genişlemiştir. Bazı kimyasal reaksiyonlar, kalbin çarpışında olduğu gibi, sarkaca benzer davranış biçimleri göstermiştir. Bir fizikçi, bu umulmadık ihtimallerin "fizyolojik ve psikiyatrik tıptan, ekonomik durum tahminlerine, hatta belki de toplumun evrimine,"[19] kadar uzanan bir alana yayıldığını yazmıştır.

Çocuk parkındaki bir salıncağı düşünün. Salıncak inişe geçtiğinde hızlanmakta, yükselirken yavaşlamakta, süratinin birazı sürtünmeden dolayı kayba uğramaktadır. Mesela, saat dakikliğiyle çalışan bir mekanizma ile salıncağın dü-

zenli bir şekilde itildiğini düşünelim. Sağduyumuz bize, salıncak sallanmaya nereden başlarsa başlasın, hareketin sonuçta düzenli bir şekilde bir ileri bir geri kalıbında karar kılacağını, salıncağın her seferinde aynı yüksekliğe kadar geleceğini söyler. Bu belki de böyledir.[20] Oysa, garip görünse bile,[21] hareketin önce geniş olan, sonra da küçülen salınımlarla hiçbir düzenli halde karar kılmadan, daha önce geçtiği şekillerden hiçbirini aynen tekrarlamadan rasgele bir şekle dönüşmesi de mümkündür.

İnsanı şaşırtan rasgele davranış biçimi, incelediğimiz basit bir salınım aygıtının içine giren ve dışına çıkan enerji akışındaki nonlineer bir değişme sonucunda meydana gelmektedir. Salıncağın hem genliği küçülmekte hem de hareketi devam ettirilmektedir: genliği küçülmektedir, çünkü sürtünme, salıncağı duruş pozisyonuna getirmeye çalışmaktadır; hareket sürdürülmektedir, çünkü periyodik bir şekilde itilmektedir. Genliği küçülen, hareketi sürdürülen bir sistem dengede olduğu zamanda bile dengede değildir; dünya da bunun gibi birçok sistemlerle doludur; bunların başında, hava gibi, bir taraftan hareket halindeki hava ile suyun sürtünmesi ve dıştaki uzay tabakalarına kaçan ısının sönümü yüzünden genliği küçülen; diğer taraftan da güneşin enerjisiyle devamlı surette itilmekte olması dolayısıyla hareketi sürdürülen sistemler gelir.

Fizikçilerle matematikçilerin 1960'lı ve 1970'li yıllarda sarkaçları yeniden ciddi ciddi incelemeye başlamalarının sebebi öngörülemezlik özelliği değildi. Öngörülemezlik sadece işin vitrin kısmıydı. Kaos dinamiğini araştıranlar basit sistemlerin düzensiz davranış biçiminde *yaratıcı* bir sürecin faaliyetini buldular. Bu sürecin ürettiği karmaşıklık içinde, organize bir çeşitliliğin zenginleştirdiği şekillerle, bazen istikrarlı bazen istikrarsız, bazen tamamlanmış bazen tamamlanmamış, fakat hep yaşamın büyüsüyle bezenmiş bir manzara sergilenmekteydi. Bilim adamlarının oyuncaklarla oynamasının nedeni de buydu.

Bu oyuncaklardan biri "Uzay Topları"[22] ya da "Uzay Trapezi" adıyla piyasada satılmakta olup, bir sarkaçın üst kıs-

mında, T harfinin yatay çizgisi gibi yerleştirilmiş bir çubuğun zıt uçlarında bulunan bir çift top ile T harfinin ayak kısmının ucundaki daha ağır bir üçüncü toptan meydana gelmektedir. Alttaki top ileri geri sallanırken üstteki çubuk da serbestçe dönebilmektedir. Topların üçünün de içinde mıknatıslar vardır; cihaz harekete geçirildikten sonra sallanmaya devam eder, çünkü kaidesinin içinde gücünü pilden alan bir elektromıknatıs bulunmaktadır. Cihaz alttaki topun yaklaştığını algılayıp her geçişinde ona küçücük bir manyetik tekme atar. Bazen aygıt düzenli, ritmik bir sallanma hareketinde karar kılar. Başka zamanlarda ise aygıtın hareketi, her an değişip durmadan şaşırtacak şekilde kaosta kalır.

Herkesin bildiği bir diğer oyuncak sarkaç, küresel sarkaç adıyla tanınan, sadece ileri geri değil her yönde serbestçe sallanabilen bir sarkaçtır. Kaidesine çepeçevre birkaç tane küçük mıknatıs yerleştirilmiştir. Mıknatıslar madenden yapılmış ağırlığı çekerler, sarkaç durduğunda bunlardan biri tarafından yakalanmış olacaktır. Burada asıl sorun, sarkacı harekete geçirmek ve hangi mıknatısın galip geleceğini tahmin edebilmektir. Üçgen biçiminde yerleştirilmiş üç mıknatıs bile olsa sarkacın hareketini öngörmek imkânsızdır. Bir süre A ve B arasında ileri geri sallanacak, sonra B ve C'ye geçecek, sonra tam C'nin üzerinde karar kılacak gibi olurken tekrar A'ya atlayacaktır. Şimdi bir araştırıcının bu oyuncağın davranışını sistematik olarak izleyerek şöyle bir harita yaptığını farzedin: Bir çıkış noktası seçsin; ağırlığı orada tutsun ve bıraksın; ağırlığın hangi mıknatıs üzerinde duruşa geçtiğine bağlı olarak noktayı kırmızı, mavi ya da yeşile boyasın. Bu harita neye benzeyecektir? Tahmin edileceği gibi, haritada sırf kırmızıya, maviye veya yeşile boyanmış bölgeler bulunacaktır; bunlar ağırlığın mıknatıslardan birine bağlı olarak sallanacağı bölgelerdir. Diğer taraftan haritada öyle bölgeler bulunacaktır ki, buralarda renkler sonsuz bir karmaşıklık içinde birbiriyle iç içe girmiş olacaktır. Ne kadar yakından bakarsanız bakın, haritayı ne kadar büyütürseniz büyütün, kırmızı bir noktanın hemen bitişiğinde yeşil noktalar da, mavi noktalar da bulunacaktır. Pratik

olarak, ağırlığın kaderi hakkında herhangi bir tahmin yürütmeye imkân olmayacaktır.

Geleneksel yaklaşıma bakılırsa, dinamikçiler bir sistemin denklemlerini yazmakla o sistemi anlamış olmanın aynı şey olduğuna inanırlar. O sistemin temel özelliklerini kavramanın daha iyi bir yolu var mıdır? Gerek çocuk bahçesindeki bir salıncak gerekse bir oyuncak bakımından, sarkacın açısını, hızını, sürtünmesini ve aygıtın hareketini sürdüren kuvveti bir arada tutan denklemler aynıdır. Ne var ki, dinamik uzmanları bu denklemlerde mevcut olan küçücük nonlineerlik unsurları yüzünden sistemin geleceğine ilişkin en basit pratik sorulara bile cevap vermekte aciz kalmaktadır. Bu sorunu bir bilgisayara havale etmek ve her kümeyi süratle hesaplayıp sorunu simüle ederek çözülmesini sağlamak mümkündür. Ancak simülasyonun da kendine özgü bazı sorunları vardır: her hesaplama işleminin bünyesinde bulunan bir nebze sapma, bütün işleme hızla hakim olur, çünkü bu sistem başlangıç durumuna hassas bağımlılığı olan bir sistemdir. Çok geçmeden, sinyal kaybolur; geriye gürültüden başka bir şey kalmaz.

Hakikaten böyle mi olur? Lorenz öngörülemezliği bulmuş, fakat bunun yanı sıra şekli de bulmuştur. Diğer bazı araştırıcılar da, görünürde gelişigüzel olduğu hissini veren davranış biçimlerinin arasında bir yapı mevcut olduğuna ilişkin bazı izler keşfetmişlerdir. Sarkaç örneğini önemsemeye değmeyecek kadar basit görenler olmuştur, ancak bunun tersini düşünenler arasında, bu örnekte teşvik edici mesajlar bulanlar da vardır. Bu bilginler bir bakıma, fizik biliminin sarkaç hareketindeki temel mekanizmaları gayet iyi anladığının, ancak bu anlayışı uzun bir süreye yayamadığının farkına varmışlardır. Mikro düzeydeki parçalarda anlaşılmayacak hiçbir şey yoktu; makro düzeydeki davranış biçiminin esrarını çözmek mümkün olamıyordu. Sistemlere dar çerçevede bakmak - yani mekanizmaları tecrit etmek, sonra da birbirine eklemek - şeklindeki geleneksel yaklaşım çözülmeye başladı. Temel denklemleri bilmek, sarkaçlar için, akışkanlar için, elektronik devreler için, lazerler için gerek duyulan türden bilgi ihtiyacını karşılamaya artık yetmiyordu.

1960'lı yıllar boyunca, bazı fizikçiler ayrı ayrı sürdürdükleri çalışmalarla Lorenz'in buluşuna paralel birtakım buluşlar yapmışlardır: Galaksilerin yörüngelerini inceleyen bir Fransız astronomi bilgininin[23] ile elektronik devreleri modelleyen bir Japon elektrik mühendisinin[24] buluşlarını bunun örnekleri arasında sayabiliriz. Ancak, global davranış biçimi ile dar çerçeve içindeki davranış biçimi arasındaki farkın nasıl oluştuğunu anlamak için bilinçli ve koordine olarak yapılan ilk girişimi matematikçiler başlattılar. Bunlar arasında adından bahsedeceğimiz Berkeley'deki Kaliforniya Üniversitesinden Stephen Smale, ününü, çok boyutlu topoloji problemlerini en dar kapsamdaki bilimsel çevrelere hitap edecek şekilde ortaya koyması dolayısıyla kazanmış bulunuyordu. Genç fizikçilerden biri,[25] sırf laf olsun diye Smale'in[26] hangi konu üzerinde çalıştığını sordu. Aldığı cevapla da şaşkına döndü: "Salınıcılar." Bu kadarı da saçmalıktı. Salınıcılar - sarkaçlar, yaylar veya elektrik devreleri - fizikçilerin daha staj döneminin başlarında iken bitirdiği problemler arasında sayılırdı. Gayet kolay meselelerdi. Böyle büyük bir matematikçi durduk yerde ne diye fiziğin temel sorunlarıyla uğraşsındı ki? Genç fizikçi Smale'in nonlineer salınıcılarla, kaotik salınıcılarla ilgilendiğinin ve fizikçilerin görmemeyi marifet saydıkları sorunları gördüğünün farkına ancak yıllar sonra varabilecekti.

Smale ortaya kötü bir kuram koymuştu. Pratik olarak, bütün dinamik sistemlerin çoğu zaman, pek acayip olmayan davranış biçimlerinde karar kılmaya yöneldiğini en katıksız matematik ifadelerle önermişti. Ama o da çok kısa zamanda öğrendi ki, bu iş o kadar basit değildi.

Smale sadece kendi başına problem çözen bir matematikçi değildi; başka matematikçilerin de çözmesi için problem programları hazırlamaktaydı. Hem tarihi kavrayış tarzı hem de doğa hakkındaki sezgilerine dayanarak geliştirdiği bir beceriyi ortaya koyarak, matematikçiler için, şimdiye kadar hiçbir araştırmada ele alınmamış bulunan bir alana girmek vaktinin artık geldiğini ifade ediyordu. Aynen başarılı bir işadamının yapacağı gibi, riskleri değerlendirdi ve so-

ğukkanlılıkla stratejisini planladı; sonra, Fareli Köyün Kavalcısı gibi öne düşmesiyle birlikte birçok araştırıcıyı da peşine taktı. Oysa Smale şöhretini sadece matematikle kazanmış değildi. Vietnam savaşının ilk yıllarında Jerry Rubin'le ikisi "Uluslararası Protesto Günleri" düzenlemişler ve trenlerin Kaliforniya'dan geçerek cepheye asker götürmesini önleme girişimlerini desteklemişlerdi. 1966'da, Temsilciler Meclisinin Amerika Aleyhtarı Faaliyetler Komisyonu Smale aleyhinde soruşturma açtırmaya çalışırken o kalkıp Moskova'ya gitmiş ve orada toplanan Uluslararası Matematikçiler Kongresine katılmıştı. Moskova'da Smale, mesleğin en yüksek nişanı olan Fields madalyasını aldı.

O yaz Moskova'da görülen manzara[27] Smale efsanesinin en unutulmaz bölümünü teşkil eder. Hem tahrik edilmiş olan hem kendileri de tahrik etmekten geri kalmayan beş bin matematikçi toplanmıştı. Siyasal gerilim had safhadaydı. Dilekçeler elden ele dolaştırılıyordu. Konferansın sonlarına doğru, Smale Kuzey Vietnamlı bir muhabirin talebini geri çevirmeyerek Moskova Üniversitesinin girişindeki merdivenin geniş basamakları üzerinde bir basın toplantısı düzenledi. Amerika'nın Vietnam'a müdahalesini kınayarak sözlerine başladıktan sonra, tam ev sahiplerinin yüzlerinde tebessümler belirdiği anda, Sovyetlerin Macaristan'ı istila etmesini ve Sovyetler Birliğinde siyasal özgürlüğün mevcut olmayışını da kınayan bir konuşma yaptı. Sözleri biter bitmez Smale'i bir otomobile atıp Sovyet makamları tarafından sorgulanmak üzere götürdüler. Kaliforniya'ya döndüğünde,[28] National Science Foundation (Ulusal Bilim Kurumu) Smale'in araştırma ödeneğini iptal etti.

Smale'e verilen Fields nişanı topoloji alanında yaptığı bir çalışma dolayısıyla ödüle layık bulunduğunun belgesiydi. Yirminci yüzyılda gelişen ve 1950'li yıllarda en parlak çağını yaşayan bir matematik dalı olan topoloji şekiller bükülme, gerilip uzatılma ya da sıkıştırılma sonucunda deforme olduklarında değişmeden kalan özellikleri inceleyen bir bilim dalıdır. Şeklin kare ya da daire olmasının, büyük ya da küçük olmasının topolojide hiçbir önemi yoktur, çünkü uzatma

operasyonu bu özellikleri değiştirebilecektir. Topologlar bir şeklin bağlantılı olup olmadığını, delikleri bulunup bulunmadığını, düğümlü olup olmadığını sorarlar. Yüzeyleri Öklid'in bir boyutlu, iki boyutlu ve üç boyutlu evrenlerinden ibaret görmeyip gözün algılayamayacağı kadar çok boyutlu uzaylar içinde tahayyül ederler. Topolojiye lastik yüzeyler üzerinde uygulanan geometri denebilir. Kantitatif olan şeylerle değil, kalitatif olan şeylerle ilgilidir. Şu soruyu sorar: "Ölçüleri bilmiyorsanız tüm yapısı hakkında söyleyeceğiniz neler var?" Smale topoloji tarihindeki çözülememiş önemli problemlerden biri olan beş ve daha fazla boyutlu mekânlara ilişkin Poincaré kuramı problemini çözmüştü ki, bu başarısıyla kendi sahasındaki en büyüklerden biri olarak sağlam bir yer elde etti. Fakat, buna rağmen 1960'lı yıllarda, daha önce hiç denenmemiş bir alana atlayarak topolojiyi terketti. Dinamik sistemleri incelemeye başladı.

Gerek topoloji gerekse dinamik sistemlerin geçmişi, bu iki konuyu bir madalyonun iki yüzü olarak gören Henri Poincaré'ye kadar dayanır. Poincaré yüzyılın başlarında, fizik dünyasındaki hareket kanunlarını araştırmak için geometrinin sağladığı hayalgücünden yararlanan büyük matematikçilerin en sonuncusuydu. Kaos ihtimalini anlayan ilk bilgin odur; yazılarında ihsas ettiği öngörülemezlik neredeyse Lorenz'in keşfettiği öngörülemezlik kadar katıydı. Poincaré'nin ölümünden sonra topoloji gelişmesini sürdürürken, dinamik sistemler yok olup gitti. Adı bile kullanılmaz hale geldi: Smale'in ilgilendiği konu diferansiyel denklemler adıyla biliniyordu. Diferansiyel denklemler zaman içinde sistemlerin devamlı olarak nasıl değiştiğini tanımlar. Bilimin geleneksel yaklaşımı bu gibi konulara dar çerçevede bakmaktı; yani mühendisler veya fizikçiler aynı anda birden fazla ihtimal kümesini ele almamalıydılar. Aynı Poincaré gibi, Smale de bu sorunları global düzeyde anlamak istedi; yani bütün bir ihtimaller âleminin tamamını bir kerede kavramak istedi.

Dinamik bir sistemi tanımlayan - mesela Lorenz'inki gibi - herhangi bir denklemler kümesi daha ilk başta birtakım parametrelerin tespit edilmesini gerektirir. Isı konveksiyonu du-

rumunda, parametrelerden biri akışkan cismin viskozitesini belirlemekte kullanılır. Parametrelerde yapılacak büyük değişiklikler, sistemde de büyük farklar doğmasına neden olur - mesela, düzenli bir hale gelmek ile periyodik olarak salınmak arasındaki fark gibi. Ancak fizikçiler çok küçük değişikliklerin çok küçük farklara neden olacağını, bu farkların da davranış biçiminde nitelik değişiklikleri meydana getirmeyip, sadece sayılarda ortaya çıkacağını varsaymışlardır.

Topoloji ile dinamik sistemler arasında irtibat kurulması sayesinde, bir sistemin bütün davranış biçimlerini içeren tabloyu görselleştirmeyi sağlayabilecek bir şekil kullanmak mümkün hale gelmektedir. Basit bir sistemde, bu şekil şu veya bu biçimde eğimli bir yüzey olabilir; karmaşık sistemlerde ise çok boyutlu bir çokluluk olabilir. Böyle bir yüzey üstündeki tek bir nokta belirli bir sistemin zaman içinde dondurulmuş bir anda bulunduğu hali göstermektedir. Bir sistem zaman içinde yol alırken bu nokta da hareket etmekte ve bahis konusu yüzey üzerinde bir yörünge çizmektedir. Şeklimizi biraz büktüğümüz takdirde sistemin parametrelerini değiştirmiş olacağımızdan, akışkanı daha ağdalı yapmış ya da sarkacı biraz daha sert hareketlendirmiş oluruz. Birbirine benzer gibi görünen şekiller birbirine benzer gibi görünen davranış biçimleri verir. Şekli görselleştirebildiğiniz takdirde sistemi anlamanız da mümkün olur.

Smale dinamik sistemlerle ilgilenmeye başladığında, sırfi matematik alanlarının birçoğunda olduğu gibi, topoloji araştırmalarının yürütülüşünde de, gerçek dünyaya ait uygulamalara karşı açıkça konulan bir küçümseme tavrı hakimdi. Topoloji kökeni itibariyle fiziğe yakın bir bilim dalıydı, fakat matematikçilerin gözünde, topolojinin fiziksel kökeni unutulmuş ve şekiller sırf kendi varoluşları nedeniyle incelenir olmuştu. Arınmışlığın içinde en arınmışı olarak Smale de, bu temel ilkeyi tamamen benimsemiş olmasına rağmen topolojinin soyut, dar bilimsel çerçeve içindeki gelişmesi sayesinde şimdi, fiziğe bir katkıda bulunulabileceği düşüncesindeydi ki asrın başlarında Poincaré'nin bir nebze yapmaya çalıştığı da buydu.

Smale'in tesadüfen gerçekleştirdiği ilk katkılardan biri, ortaya attığı yanlış kuramdır. Fizik bilimi açısından aşağı yukarı şuna benzeyen bir doğa kanunu öneriyordu: Bir sistem yönü, izi belirsiz gelişigüzel davranış biçimi gösterebilir, ancak yönü, izi belirsiz gelişigüzel davranış biçimi *istikrarlı* olamaz. İstikrar - matematikçilerin zaman zaman söylediği gibi "Smale'in kastettiği anlamdaki istikrar" - hayati önemi olan bir özelliktir. Bir sistemin içindeki istikrarlı davranış biçimi, sırf şu veya bu sayı belli belirsiz bir değişikliğe uğradı diye kaybolması gerekmeyecek olan davranış biçimidir. Her sistemin içinde hem istikrarlı hem de istikrarsız davranış biçimleri bulunabilir. Ucu üstünde dik vaziyette dengede duran bir kurşun kaleme hükmeden denklemlere matematik olarak güzel bir çözüm bulabilirsiniz; bunun için, ağırlık merkezinin doğrudan doğruya ucun üstünde bulunması gerekir - ne var ki, bu çözümün istikrarsız olduğu gerekçesiyle bir kurşun kalemini ucunun üstünde dik vaziyette dengede tutamazsınız. En küçük pertürbasyon halinde sistem bu çözümden uzaklaşır. Diğer taraftan, bir tasın dibinde duran bir bilya orada öylece kalır, çünkü bilya pertürbasyona uğrarsa hafifçe geri yuvarlanacaktır. Fizikçiler gerçek hayatta herhangi bir davranış biçimi üzerinde düzenli bir şekilde gözlem yapabilmeleri için bu davranış biçiminin istikrarlı olması gerektiği varsayımından hareket etmişlerdir; çünkü, gerçek hayattaki sistemlerin, önemsenmeyecek kadar küçük de olsa huzursuzluklardan ve belirsizliklerden uzak durmasına imkân yoktur. Parametreleri hiçbir zaman tam olarak bilemezsiniz. Hem fiziksel olarak gerçek hayatı yansıtan hem de küçük pertürbasyonlara dayanabilecek ölçüde sağlam olan bir modeliniz olmasını istiyorsanız, fizikçi mantığına göre mutlaka istikrarlı bir model istiyorsunuz demektir.

1959 yılında, Smale karısı, bebek yaşlardaki iki çocuğu ve bir sürü çocuk beziyle geçici olarak Rio de Janeiro'da küçük bir apartman dairesinde yaşarken kötü haber Noel'den hemen sonra postadan çıktı. Ortaya attığı kuramla hepsi de yapısal olarak istikrarlı olan diferansiyel denklemlerden oluşan bir kümeyi tanımlamıştı. Smale'in iddiasına göre, istediğiniz

herhangi bir kaotik sistemin, kendi kümesi içindeki sistemlerden biriyle yaklaşık değerini, istediğiniz yakınlık derecesinde almanız mümkündü. Oysa aslında durum öyle değildi. Meslektaşlarının birinden aldığı bir mektupta,[29] birçok sistemin kendi tahayyül ettiği gibi, o kadar düzgün bir davranış biçimine sahip olmadığı anlatılıyor ve bir karşıt örnek olarak kaos ve istikrarı bünyesinde yan yana birlikte barındıran bir sistem tanımlanıyordu. Bu sistem sağlamdı. Nasıl olsa her tabii sistem gürültüden dolayı sürekli olarak pertürbasyona uğradığına göre, siz hafif bir pertürbasyon meydana getirdiğiniz zaman, bu sistemdeki gariplik de ortadan kalkmayacaktı. Sağlam ve garip[30] - Smale mektubu okudukça kuşkuları yavaş yavaş yok olmaya başladı.

Kaos ve istikrarsızlık, usulüne uygun tanımları daha yeni yapılmaya başlanmış kavramlar olarak birbirinden tamamen farklı şeylerdi. Kaotik bir sistemin kendi karakterine özgü olan düzensizliği, küçük huzursuzluklara karşı direnebilecek durumda ise bu sistemin istikrarlı olması mümkündü. Lorenz'in sistemi buna iyi bir örnek teşkil eder - fakat, Smale'in Lorenz'in adını duyması için daha çok yıllar geçmesi gerekecekti. Lorenz'in keşfettiği kaos, bütün öngörülemezliğine rağmen, bir tasın içindeki bilya kadar istikrarlıydı. Bu sisteme ister gürültü ilave edin, ister çalkalayın, ister karıştırın, isterseniz hareketine müdahale edin, her şey yerli yerine oturup geçici etkiler dar bir vadideki yankılar gibi yavaş yavaş yok olup gittikten sonra, sistem tekrar kendine özgü olan aynı önceki şekline dönecekti. Yerel açıdan bakıldığında öngörülemezlik vardı; global düzeyde bakıldığında ise istikrar vardı. Gerçek hayattaki dinamik sistemlerde, hiç kimsenin akıl edemeyeceği kadar çok karmaşık olan bir dizi kural da işin içine giriyordu. Smale'in meslektaşından aldığı mektupta, yirmi, yirmi beş yıl kadar önce keşfedilmiş ama hafızalardan tamamiyle silinmiş olan bambaşka bir basit sistem örnek olarak anlatılıyordu. Bu, kılık değiştirmiş bir sarkaçtı: salınım halindeki bir elektronik devre. Bu devre hem nonlineerdi hem de salıncakta sallanan bir çocuk örneğindeki gibi, üzerine periyodik olarak bir kuvvet tatbik ediliyordu.

Bahis konusu olan, gerçekten de, 1920'li yıllarda Balthasar van der Pol adlı Hollandalı bir elektrik mühendisinin incelediği vakumlu bir tüpten[31] başka bir şey değildi. Modern fizik okuyan bir öğrenci böyle bir salınıcının davranış biçimini bir osiloskop ekranında çizilen çizgiye bakarak araştırabilir. Oysa Van der Pol'un elinde osiloskop yoktu; bu yüzden incelediği devreyi ancak bir telefon cihazındaki sinyaller değişmesinden kaynaklanan ton farklarını dinlemek suretiyle kontrol edebiliyordu. Sistemi besleyen akımı değiştirdikçe, incelediği davranışta düzenlilikler keşfediyor olması ona büyük zevk veriyordu. Telefonun tonu adeta bir merdivenin basamaklarını tırmanırcasına frekanstan frekansa sıçrıyor, bir frekanstan ayrıldıktan sonra bir sonrakine sıkıca kenetleniyordu. Van der Pol gene de, arada sırada garip bir şeyler olduğunu sezinledi. Davranış biçimi bir türlü izah edemediği bir şekilde düzensizlik gösteriyor gibiydi. Mevcut şartlar altında endişe duyması için bir sebep yoktu. *Nature* dergisine yazdığı bir mektupta, "Telefon alıcılarında bir frekans bir sonraki daha düşük değere atlamadan önce genellikle düzensiz bir gürültü duyulmaktadır,"[32] diyordu. "Bununla birlikte, bu marjinal bir fenomendir." Van der Pol da kaosu kapı aralığından görebilmiş, fakat onun dilini anlayamamış birçok bilim adamından biriydi. Vakumlu tüpler imal etmek isteyen kimseler için frekansı kilitleme konusu büyük önem taşıyordu. Ancak karmaşıklığın doğasını anlamaya çalışan kimseler için asıl ilginç olan davranış biçimi, bir yüksek frekansla bir alçak frekansın birbiriyle çatışması dolayısıyla meydana gelen "düzensiz gürültü" olarak ifade edilebilir.

Kuramının yanlışlığına rağmen, Smale, dinamik sistemlerin bütün karmaşıklığın kavramak için bir çare aradığı sırada, gene de bu kuramı sayesinde kendisini doğrudan doğruya yepyeni bir yolun başında buldu. Birçok matematikçi van der Pol salınıcısının sağladığı imkânları geçmişte kendi açılarından incelemişti; şimdi de Smale onların yapmış olduğu bu çalışmaları yeni bir mecraya döküyor, yepyeni ufuklar açıyordu. Smale'in elindeki tek osiloskop ekranı bizzat kendi zihniydi; ama bu zihin, topoloji dünyasında yıllarca sürmüş

araştırmalardan kazanılmış tecrübelerin zenginliğini taşıyordu. Smale bir osilatörde mevcut olabilecek bütün ihtimalleri, fizikçilerin tâbiriyle faz uzayının tamamını tespit etti. Zaman içinde dondurulmuş herhangi bir anda, sistemin bulunduğu pozisyon faz uzayındaki bir nokta ile gösteriliyordu; bulunduğu pozisyona ya da hızına ilişkin bütün bilgiler bu noktanın koordinatlarında yer almaktaydı. Sistem herhangi bir şekilde değişikliğe uğradıkça, bu nokta da faz uzayının içindeki yeni bir pozisyona geçecekti. Sistem devamlı olarak değiştiğinden, nokta bir yörünge çizecekti.

Sarkaç gibi basit bir sistem için, faz uzayının bir dikdörtgenden ibaret olması mümkündür: belirli bir anda sarkacın açısı bir noktanın doğu-batı yönündeki pozisyonunu, sarkacın hızı da kuzey-güney yönündeki pozisyonunu belirler. Düzenli bir şekilde ileri geri sallanan bir sarkaç için, faz uzayını boydan boya kateden güzergâh bir sarmal halini alacak ve sistem tekrar tekrar aynı pozisyonlardan geçtikçe kendi etrafında sarılarak dönmeye devam edecektir.

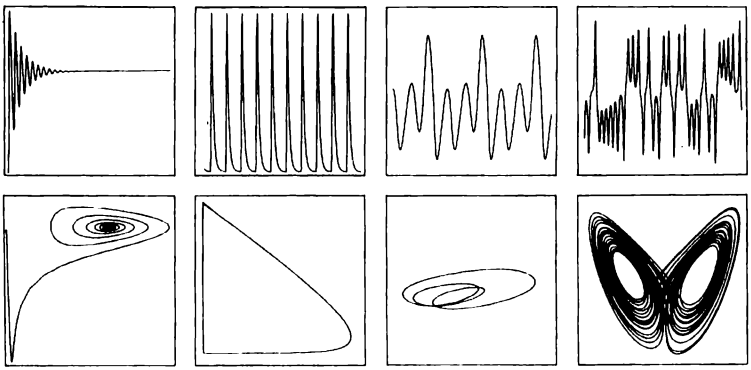
Smale bu güzergâhlardan herhangi birine bakmak yerine, bütün dikkatini, sistem değiştikçe (meselâ daha fazla itici enerji eklendikçe) uzayın tümünün gösterdiği davranış üzerinde topladı. Sağduyusu ona, sistemin fiziksel özünden ayrılıp yepyeni tür bir geometrik öze geçmesini öğütlüyordu. Elindeki araçlar şekillerin faz uzayı içindeki topolojik transformasyonundan - uzama ve sıkışma gibi transformasyonlardan - ibaretti. Bu transformasyonların zaman zaman açık ve seçik fiziksel anlamlar ifade ettiği de görülmekteydi. Bir sistem içindeki sönümün, yani enerjiyi sürtünme yüzünden kaybetmenin anlamı, sistemin faz uzayı içindeki şeklinin aynı hava kaybeden bir top gibi kasılacağı - sonunda sistemin tam duruşa geçtiği andaki noktaya erişinceye kadar büzülmeye devam edeceği demekti. Van der Pol salınıcısının kompleksliğini tümüyle kavrayabilmek için, Smale faz uzayının birtakım yeni kompleks transformasyon kombinasyonlarına tabi olabileceğinin farkına vardı. Bunun üzerine, global davranış biçimini görselleştirmeye ilişkin fikrini hızla yeni bir modele dönüştürmeye girişti. Yeni buluşu - daha

sonraki yıllarda da sık sık karşılaşılan kalıcı bir kaos imajı - at nalı adıyla tanınmış olan bir yapıdan ibaretti.

Smale'in at nalının basit bir versiyonunu yapabilmek için[33] bir dikdörtgen alın; üstten ve alttan bastırıp yatay bir çubuk haline getirin. Çubuğun bir ucundan tutup ikiye katlayın ve diğer ucun üzerine gelecek şekilde çekip uzatarak bir at nalı gibi, bir C harfi şekli verin. Sonra, at nalını başka bir dikdörtgenin içine oturtulmuş olarak tasavvur edin ve aynı transformasyonu, sıkıştırarak, katlayarak ve çekip uzatarak tekrar edin.

Bu proses karamela imal eden bir makinenin çalışmasına benzer:[34] Alet, dönen kollarıyla macunu çekip uzatmakta, ikiye katlamakta, tekrar çekip uzatmakta ve bu işleme macunun yüzeyi iyice uzamış, çok incelmiş ve kendi içinde artık ayrılamayacak kadar üst üste sarılmış oluncaya kadar devam etmektedir. Smale at nalını bir dizi topolojik işlemlerden geçirmiş; işin matematik kısmını bir yana ayırdıktan sonra da, Lorenz'in birkaç yıl sonra atmosferde keşfedeceği başlangıç durumuna hassas bağımlılığın tam bir görsel benzerini bu at nalı sayesinde bulmuştur. İlk başladığınız uzayda birbirine yakın iki nokta seçin, sonunda bunların soluğu nerede alacaklarını tahmin etmeniz mümkün değildir. Bütün katlama ve çekip uzatma olayları dolayısıyla birbirlerinden gelişigüzel bir biçimde uzağa itileceklerdir. Aynı şekilde, birbirine gayet yakın durumda bulunan iki noktanın başlangıçta birbirinden gelişigüzel bir şekilde uzakta başlamış olması mümkündür.

İşin başında, Smale bütün dinamik sistemleri germe ve sıkıştırma olayları olarak izah edebileceği ümidindeydi; bu düşüncesinde katlama işleminin, daha doğrusu bir sistemin istikrarını olduğu gibi bozacak durumdaki bir katlamanın yeri yoktu. Ne var ki, katlamanın[35] da gerekli olduğu ortaya çıktı; katlama dinamik davranış biçiminde kesin değişiklikler olmasına yol açıyordu. Smale'in at nalı, hareketin içerdiği ihtimaller hakkında matematikçi ve fizikçilere yeni bir sezgi sağlayan birçok geometrik şekil arasında birincisi olma özelliğini muhafaza etti. Bazı bakımlardan, yapaylığı do-

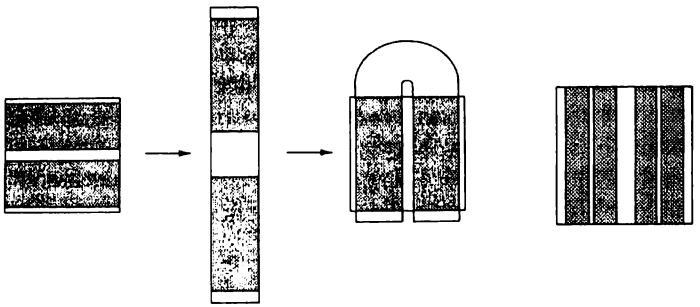


FAZ UZAYINDA PORTRELER ÇİZİLMESİ. Geleneksel zaman dizileri (yukarda) ve faz uzayındaki yörüngeler (aşağıda) aynı verileri sergilemenin ve bir sistemin uzun süreli davranış biçimine ilişkin bir resim elde etmenin iki değişik yolunu teşkil eder. Birinci sistem (solda) düzenli bir halde kalıp birleşmektedir - bu faz uzayındaki bir noktadır. İkincisi kendi kendini periyodik olarak tekrarlamakta, devresel bir yörünge çizmektedir. Üçüncüsü kendi kendisini daha kompleks bir vals ritmiyle, "üçlü periyotlu" bir devre ile tekrarlamaktadır. Dördüncüsü ise kaotik özelliklere sahiptir.

layısıyla herhangi bir fayda beklenmediği gibi, matematiksel topolojinin yarattığı bir eser olarak da fizikçilere pek cazip gelmedi. Gene de bir çıkış noktası olarak çok işe yaradı. Smale 1960'lı yıllarda, dinamik sistemler üzerindeki bu yeni çalışmalardan duyduğu heyecanı kendisiyle paylaşan bir grup genç matematikçiyi Berkeley'de etrafına topladı. Bu grubun araştırmaları daha somut bilim dallarının dikkatini tamamen çekinceye kadar aradan bir on yıl daha geçti, fakat ondan sonra da fizikçiler Smale'in matematiğin bütün bir dalını gerçek dünyanın sorunlarına doğru çekip getirdiğini gördüler. Bunu bir altın çağ olarak değerlendirdiler.[36]

Smale'in arkadaşlarından, Santa Cruz'daki Kaliforniya Üniversitesinde matematik profesörü olan Ralph Abraham, "Bu olay, paradigma değişikliklerinin paradigma değişikliğidir,"[37] demiştir.

"Matematik alanını meslek olarak seçip çalışmaya başladığım 1960 yılında (zaten o günden bu yana çok zaman geçmiş sayılmaz), fizikçiler, hatta en avangart matematiksel fizikçiler bile, modern matematiği tamamiyle - *tümüyle* - red-



SMALE'İN AT NALI. Bu topolojik transformasyon sayesinde dinamik sistemlerin kaotik özelliklerini anlamak için gereken asıl bilgiler sağlanmıştır. Temeli gayet basittir: Bir alan bir yöne doğru çekilip uzatılmakta, bir başka yönde sıkıştırılmakta ve sonra da katlanmaktadır. Proses tekrarlandığında, daha önce oklavayla çok katlı hamur açmış olan kimselerin aşinâ olduğu bir nevi yapısal bir karışım ortaya çıkmaktadır. Sonuçta birbirine yakın duruma gelen bir çift nokta başlangıçta birbirinden epeyi uzakta bulunmuş olabilir.

detmekteydi. Bundan dolayı, diferansiyel dinamik, global analiz, fonksiyonların birçok türleri, diferansiyel geometri - yani Einstein'ın kullanmış olduğu bütün tekniklerin bir ya da iki yıl daha sonraki hali - gibi ne varsa hepsi reddolundu. Matematikçilerle fizikçiler arasındaki flört dönemi 1930'lu yıllarda sona erdi ve birbirlerinden tamamen koptular. Bu iki gruba mensup bilim adamları birbirleriyle konuşmazlardı bile. Birbirlerini aşağılamaktan da hiç geri kalmazlardı. Matematiksel fizikçiler lisansüstü öğrencilerinin matematik derslerini matematikçilerden almasına karşı çıkarlardı: *Matematiği bizden alın. Sizin neyi bilmeniz gerekiyorsa biz size öğretiriz. Matematikçilerin bencilliği onlarda akıl bırakmamıştır; sizin de aklınızı başınızdan alırlar.* Bahsettiğim olaylar 1960 yılında meydana geliyordu. 1968'lere kadar bu durum tamamen değişmiştir." Sonuç olarak, bütün fizikçiler, astronomi uzmanları ve biyoloji uzmanları bu konudan haberdar olmak gerektiğini anlamışlardır.

Basit bir kozmik esrar:[38] Jüpiter'in Büyük Kırmızı Lekesi, geniş, oval biçimli bir burgaç biçimiyle, hiç yerinden kıpırdamayan ve hiç de dinmeyen muazzam bir fırtına gibidir. 1978

yılında Voyager 2'nin uzaydan bize ulaştırdığı fotoğrafları gören herkes, bildiğimiz ölçeklerin hiçbirine sığmayacak büyüklükteki bir türbülansın âşinası olduğumuz görüntüsünü teşhis edebilmiştir. Bu olay güneş sisteminin en kutsal sayılan temel taşlarından biriydi - John Updike bunu şöyle tasvir ediyordu: "Istırapla kıvranan bir göz gibi kükreyen o kırmızı leke/Fokur fokur kirpiklerden çıkmış bir türbülansın orta yerinde."[39] Pekiyi ama, *neydi* bu? Lorenz, Smale ve diğer bazı bilim adamlarının tabiatın akışını kavrayabilmek için ortaya yeni bir yaklaşım koydukları günlerin üzerinden yirmi yıl geçtikten sonra, Jüpiter'in öbür dünyaya aitmiş hissi veren havası, kaos biliminin çıkmasıyla birlikte doğadaki ihtimallerin değişime uğrayan bir yüzünü bekleyen birçok problemden biri olduğunu ortaya koymuştur.

Üç asırdan beri bu lekenin verdiği izlenim, "ne kadar çok şey bilirseniz, o kadar az şey biliyorsunuz demektir"den ibaret olmuştur. Galileo'nun teleskopunu Jüpiter'e ilk doğrulttuğu andan çok uzun zaman geçmeden, astronomi uzmanları büyük gezegenin üzerinde bir leke bulunduğunun farkına vardılar. Robert Hooke lekeyi daha 1600'lü yıllarda gördü. Donati Creti'nin yaptığı resim, Vatikan'ın resim müzesinde bulunmaktadır. Renkleri itibariyle lekeyi tanımlamak için çok ayrıntılı izahat vermeye gerek yoktu. Ancak, teleskoplar daha gelişti, bilgi ise cehaleti körükledi. Geçen yüzyılda birbirinin ardı sıra ortaya atılan teorilerin ardı arkası kesilmedi. Mesela:

Akan Lâvlar Teorisi. On dokuzuncu yüzyılın sonlarında bilim adamları bir yanardağın ağzından dışarı akan erimiş lâvlardan meydana gelmiş muazzam büyüklükte beyzi bir göl tasavvur etmişlerdir. Bir diğer ihtimal de gezegenin ince ve sert kabuğuna çarpan bir göktaşının açtığı delikten lâvların dışarı akmış olmasıydı.

Yeni Ay Teorisi. Bunun tam aksine, bir Alman bilim adamı da, lekenin, gezegenin yüzeyinden kopmak üzere olan yeni bir ay olduğunu ileri sürmüştür.

Yumurta Teorisi. Yeni bir olgu ortalığı karıştırmıştır: Lekenin gezegenin üzerinde hafif hafif yer değiştirmekte oldu-

ğu görülmüştür. Bunun üzerine 1939 yılında öne sürülen bir izah tarzında, aynen suyun üzerinde yüzen bir yumurta gibi lekenin de atmosferin içinde yüzen az veya çok sert bir cisim olduğu düşünülmüştür. Bu teorinin bazı değişik şekilleri (sürüklenen bir hidrojen veya helyum balonu yaklaşımı da dahil olmak üzere) yirmi, otuz yıl boyunca geçerli kalmıştır.

Gaz Sütunu Teorisi. Bambaşka bir yeni olgu: Leke sürüklenmesine rağmen hiçbir zaman çok uzaklara sürüklenmemiştir. Bundan dolayı 1960'lı yıllarda bilim adamları lekenin muhtemelen bir kraterden gelip yükselen bir gaz sütununun tepe kısmı olduğunu öne sürmüşlerdir.

Bundan sonra Voyager geldi. Astronomi uzmanlarının birçoğu yakından bakma imkânını bulabilecekleri için esrarı çözeceklerine inandılar; gerçekten de, Voyager'in uçuşu ortaya yeni verilerden oluşan müthiş bir albüm çıkardı; ne var ki, veriler gene de yeterli değildi. 1978'de uzay gemisinden alınan resimler çok güçlü rüzgârlar ve renkli burgaçların varlığına işaret ediyordu. Gök bilimciler, manzaranın detaylarına indiklerinde, lekenin kendi merkezinde sarmallaşarak akan bir kasırga sistemi gibi, bulutları çevresine savurduğunu ve gezegenin çevresinde ufki şeritler oluşturan doğu-batı yönündeki rüzgâr bölgeleri içinde hapsolduğunu görmüşlerdir. Bu tanıma bakarak düşünülebilecek en iyi isim kasırga * olabilirdi, ancak, birçok sebepten ötürü bu tanım yetersiz kalıyordu. Yeryüzünün kasırgaları nemin kondanse olup yağmura dönüşmesi üzerine açığa çıkan ısıdan beslenip güç alırlar; oysa Kırmızı Lekeyi besleyecek hiçbir nem prosesi mevcut değildi. Kasırgalar, yeryüzündeki bütün fırtınalarda olduğu gibi siklon yönünde, yani Ekvatorun yukarısında saatin ters yönünde, aşağısında ise saat yönünde dönerler; Kırmızı Lekenin dönüşü antisiklon yönündedir. Daha da önemlisi, kasırgalar birkaç gün sonra yok olmaktadırlar.

Astronomlar Voyager'in resimlerini incelerken gezegenin hemen hemen tamamiyle hareket halindeki bir akışkandan meydana geldiğinin da farkına vardılar. Şimdiye kadar hep yeryüzünün atmosferi gibi zar kadar ince bir atmosferin çev-

*İngilizce metinde *Hurricane*. (ç.n.)

relediği katı bir gezegeni inceledikleri düşüncesine göre şartlanmışlardı; oysa Jüpiter'in bir tarafında belki de katı bir çekirdeği vardı, ancak bu çekirdeğin gezegenin yüzeyinden çok uzaklarda olduğu muhakkaktı. Gezegen aniden kocaman bir akışkan dinamiği deneyi gibi görünüverdi; Kırmızı Leke de işte orada, çevresini saran kaosa rağmen hiçbir pertürbasyona uğramaksızın düzenli bir şekilde kendi etrafında dönüp duruyordu.

Leke bir gestalt* testi haline geldi. Bilim adamları sezgileriyle neyi algılamaları mümkünse o kadarını görebildiler. Türbülansı gelişigüzel ve gürültülü bir olay olarak düşünmeye alışmış bir akışkan dinamiği uzmanının, Lekenin tam orta yerinde bir istikrar adası bulunmasına bir anlam vermesi imkânsızdı. Voyager, akıntının yeryüzündeki en güçlü teleskoplarla bile görülmesi mümkün olamayacak kadar küçük ölçekli özelliklerini göstermesi yüzünden, o esrarlı olayı bir kat daha içinden çıkılmaz hale getirmişti.[40] Küçük ölçeklerde, düzensizliğin gayet süratli bir harekete dönüştüğü, bir günden daha kısa sürelerde girdapların ortaya çıktığı ya da kaybolduğu görülmekteydi. Oysa lekenin kendisi her türlü etkiden muaf kalıyordu. Onu böyle muhafaza eden şey neydi? Onu bulunduğu yerde tutan şey neydi?

The National Aeronautics and Space Administration (Ulusal Havacılık ve Uzay İdaresi) fotoğraflarını, ABD'de sayısı 5-6 kadar olan arşivlerinde saklar. Arşivlerden biri Cornell Üniversitesi'ndedir. 1980'li yılların başlarında, Philip Marcus adlı genç bir astronom ve uygulamalı matematikçi Üniversitenin yakınlarındaki bir yerde bulunan bürosunda çalışmaktaydı. Marcus, Voyager'den sonra Amerika Birleşik Devletlerinde ve İngiltere'de Kırmızı Lekeyi modelleme çarelerini araştıran yarım düzine kadar bilim adamının arasına girmiştir. Yapay kasırga teorisinden kurtulur kurtulmaz başka başka yerlerde daha uygun yakıştırmalar bulmaya başladılar. Mesela, Atlantik Okyanusunun batı sahillerine kadar uzanan Golfstrim akıntısı unutulamayacak şekillerle

*Almanca "şekil" anlamındaki Gestalt kelimesiyle bir yapı, bütüne bağlı oluşlarından dolayı parçalıra değişikliğe uğramış bir tüm kastedilir. (ç.n.)

kıvrımlar yapmakta ve kollara ayrılmaktadır. İçinde oluşan küçük dalgalar kıvrımlara, kıvrımlar halkalara dönüşmekte ve ana akıntıdan koparak yavaş, uzun süreli, antisiklon yönünde dönen anaforlar meydana getirmektedir. Buna paralel bir diğer olay da meteorolojide blokaj adıyla bilinen çok özel bir fenomendir. Zaman zaman bir yüksek basınç sistemi sahile yakın bölgelerde yavaşça dönmekte; haftalarca veya aylarca, normal doğu-batı akışlarına karşı direnerek yer etmektedir. Blokaj global düzeydeki hava durumu tahmini modellerinin düzenini bozmuş, fakat alışılmadık uzunlukta süregiden birtakım düzenli özellikler gösterdiğinden bir bakıma, meteoroloji uzmanlarının ümitlerini de arttırmıştır.

Marcus NASA'nın resimlerini, ayda yürüyen insanın meşhur Hasselblad fotoğraflarını ve Jüpiter'deki türbülansın resimlerini saatlerce inceledi. Newton kanunları her yerde geçerli olduğundan, bilgisayarını akışkan denklemlerinden oluşan bir sisteme göre programladı. Jüpiter'in havasını modellemeye kalkışmak adeta ışığı olmayan bir yıldıza benzeyen, yoğun bir hidrojen ve helyum kütlesi için kurallar yazmak gibi bir şeydi. Gezegen hızla dönmekte, bir günü on dünya saati kadar sürmektedir. Hızlı dönüş nedeniyle güçlü bir Coriolis kuvveti doğmakta, bir dönme dolabın ortasından geçerek karşı tarafa giden bir insanı kenara savuran bir güç olan Coriolis kuvveti Lekenin itici gücünü teşkil etmektedir.

Lorenz yeryüzünün hava durumuna ilişkin küçücük modelini bir kâğıt rulosu üzerine ham çizgiler basmak için kullanmıştı; buna karşılık Marcus çok daha yüksek bir bilgisayar gücünden yararlanarak akıllara durgunluk veren renkli resimleri bir araya getirmeyi başardı. Önce düzey çizgisi işaretlerini yerleştirdi. Neler olup bittiğini anlayamamıştı bile. Sonra slaytlar çekti ve resimleri bir araya toplayıp hareketli bir film haline getirdi. İşte o zaman sırlar çözülmeye başladı. Parlak maviler, kırmızılar ve sarılar, dama tahtası şeklinde dönen girdaplarla birleşiyor ve beyzi bir şekil oluşturarak, NASA'nın hakiki fotoğraflarla oluşturduğu hareketli filmde görülen Büyük Kırmızı Lekeye olağanüstü bir benzerlik gösteriyordu. Marcus, "Bu büyük ölçekli lekeyi görü-

yorsunuz,[41] küçük ölçekli kaotik akıntıların ortasında ne kadar mutlu göründüğüne bakın; üstelik kaotik akıntılar da sünger gibi enerji emmektedir," dedi. "Arkadaki kaos denizinin önünde görülen şu küçücük lifli yapılara bakın."

Leke kendi kendini organize edebilen bir sistemdi; çevresindeki öngörülemez çalkantıları meydana getiren nonlineer bükülmeler tarafından yaratılmış ve düzene konulmuştu. Buna istikrarlı kaos da diyebiliriz.

Lisansüstü çalışmaları sırasında Marcus standart fizik öğrenmiş, lineer denklemler çözmüş, lineer analizlere uygun olarak hazırlanmış birtakım deneyleri gerçekleştirmişti. Bunlar huzur dolu günlerdi; doğrusu, nonlineer denklemler çözümsüzlüğe mahkûm olduğuna göre lisansüstü çalışması yapan bir öğrencinin zamanını israf etmenin ne âlemi vardı ki? Marcus'un eğitim hayatında kazandığı esaslı özelliklerinden biri de yaptığı işten zevk almaktı. Deneylerini belirli sınırlar içinde tutabildiği sürece, lineer yaklaşıklıklar yeterli olacak ve beklediği cevapları alarak mükâfatını elde etmiş olacaktı. Tabii ki, zaman zaman dünyanın gerçeklerinin deneylere karışmasını önlemek mümkün olamıyordu; bu gibi durumlarda gördüğü şeylerin kaos emareleri olduğunu Marcus ancak yıllar sonra anlayacaktı. Nitekim o zamanlar deneyin bir yerinde durup, "Hoppala! şimdi bu da nereden çıktı?"[42] dediğinde şu cevabı alacaktı: "Deneylerde böyle hatalar olur. Sen boş ver, aldırma."

Birçok fizikçiden farklı olarak Marcus en sonunda Lorenz'ten şu dersi aldı: Determinist bir sistem sadece periyodik davranışlardan ibaret değildir, başka davranış biçimleri de üretir. Marcus, keşmekeşlik düzeyindeki düzensizliği araştırıp bulması gerektiğini öğrendi; düzensizliğin ortasında yapı adacıklarının su yüzüne çıkabileceğini de öğrendi. Böylece, Büyük Kırmızı Leke meselesine getirdiği yaklaşımla, karmaşık bir sistemden aynı zamanda hem türbülans hem de tutarlılık kaynaklanabileceği anlayışını ortaya koydu. Marcus, dünyaya gözlerini yeni açan bu bilim dalında çalışmalarını sürdürürken, bir yandan da bilgisayarların deney aracı olarak kullanılması geleneği oluşmaya başlıyordu.

Marcus, yepyeni bir bilim dalıyla uğraştığını düşünmekten büyük bir zevk duymaktaydı; esas itibariyle kendisini gök bilimci saymamış, akışkan dinamikçisi de saymamış, uygulamalı matematikçi de saymamıştı; Marcus bir kaos uzmanıydı.

Hayatın İniş ve Çıkışları

Matematiksel bir gelişmenin sonuçları, araştırıcının makul bir biyolojik davranış biçiminin nasıl olması gerektiği konusundaki sezgileriyle karşılaştırılarak suretiyle devamlı olarak kontrol edilmelidir. Bu kontrol sonucunda, ortada bir uyuşmazlık olduğu meydana çıktığı takdirde, aşağıdaki ihtimallerin gözden geçirilmesi zorunludur:

a. Matematiğin formel gelişmesinde bir hata yapılmıştır;
b. Başlangıçtaki varsayımlar yanlıştır ve / veya çok kesin ve aşırı boyutlarda bir sadeleştirme teşkil etmektedir;
c. Kontrolu yapan kişinin biyolojik alana ilişkin sezgileri yeterince gelişmiş değildir;
d. Yepyeni bir temel ilke keşfedilmiştir.

HARVEY J. GOLD,
Biyolojik Sistemlerde
Matematiksel Modelleme

Aç gözlü, vahşi balıklar,[1] lezzetli planktonlar. Daha adı bile konmamış sürüngenlerin kaynaştığı yağmur ormanları, yaprakların oluşturduğu sayvanların altında kayarcasına uçan kuşlar, tıpkı bir hızlandırıcı içindeki elektronlar gibi vızıldayan böcekler. Doğaya karşı verilen amansız mücadeleye rağmen sürekli buzların sınırını oluşturan bölgede dörder yıllık periyotlarla muntazaman çoğalan ve azalan tarla fareleri ile lemmingler.* Dünyaya, çevre bilimciler için karmakarışık bir laboratuvar, içinde birbiriyle etkileşim halin-

*Kuzey Avrupa ile Asya'nın kutup bölgeleri arasında yaygın ve göçleriyle ünlü olan küçük bir kemirgen. (ç.n.)

de bulunan beş milyon canlı türünün bulunduğu bir kazan da diyebilirsiniz.[2] Yoksa elli milyon mu? Çevre bilimciler de doğrusunu gerçekten bilmez.

Yirminci yüzyılda matematik ağırlıklı düşünen biyologlar ekoloji adında yeni bir bilim dalı oluşturdular; bu bilim, gerçek hayatı gürültü ve renk unsurlarından ayıklayarak popülasyonlara dinamik sistemler muamelesi yapmıştır. Çevre bilimciler hayatın iniş ve çıkışlarını, yükseliş ve alçalışlarını tanımlamak için, matematiksel fiziğin temel araçlarını kullandılar. Gıdanın sınırlı olduğu bir yerde çoğalan bir tek canlı türleri, hayatta kalabilmek için birbirleriyle mücadele eden birçok türleri, bir sürü popülasyonu etkisi altına alan salgın hastalıkları - bunların hepsini, belki laboratuvarlarda olmasa bile biyoloji teoricilerinin zihinlerinde izole etmek imkânı vardır.

1970'li yıllarda kaosun yeni bir bilim dalı olarak ortaya çıkması üzerine, çevre bilimcilerin kaderlerinde çok özel bir görevi yerine getirme zorunluluğunun bulunduğu da anlaşıldı. Çalışmalarında matematiksel modeller kullanmalarına rağmen, bu modellerin, kaynaşma halindeki gerçek dünyaya ilişkin cılız birtakım yaklaşıklıklardan ibaret olduğunu bilmekten de hiç geri kalmadılar. Bunun tam aksine, sınırlılıkların bilincinde oluşları sayesinde matematikçilerin ilginç tuhaflıklar olarak gördüğü bazı fikirlerin önemini anlayıp değerlendirmeleri mümkün oldu. Düzenli denklemlerin düzensiz davranış biçimleri üretebiliyor olması, çevre bilimcilere göre, gözlerin açılıp ciddiye alınması gereken bir konuydu. Popülasyonlar biyolojisinde uygulanan denklemler, fizikçilerin kendi evrenlerini analiz ederken başvurdukları modellerin basit ve ilkel benzerleriydi. Oysa, tabii bilimlerin inceleme konusu olan gerçek fenomenlerin karmaşık doğasında bir fizikçinin laboratuvarında bulunması gereken şeylerden çok daha fazlası vardı. Sosyal bilimlerde zaman içinde değişen sistemler incelenirken bu sistemleri sağlam kurallara bağlamaya çalışan ekonomistlerin, demografların, psikologların ve şehir plancılarının kullandıkları modeller gibi, biyologların kullandığı matematiksel modeller de gerçeğin birer karikatürü[3] olmaktan ileri gidemiyordu. Ancak, kıstaslarda farklar

vardı. Fizikçiye göre, Lorenz'inki gibi bir denklemler sistemi o kadar basitti ki, şeffaflıktan neredeyse içi görülüyordu. Oysa, biyologlara göre, Lorenz'in denklemleri bile üç boyutlu, devamlı değişken ve analitik olarak çözümsüz halleriyle insana ürpertiler verecek derecede karmaşık sayılırdı.

Biyologlar yeni bir çalışma tarzını zorunluluktan dolayı benimsediler. Gerçek sistemlere uygun matematiksel tanımlamaları ortaya koymanın daha farklı bir yolu bulunması gerekiyordu. Belirli bir sistemi (mesela, bir yayla birbirine tutturulmuş iki sarkacı) inceleyen tutan fizikçi duruma en uygun düşen denklemleri seçerek işe başlar. Denklemlerini bulmak için tercihen bir el kitabına başvurur; el kitabı yoksa doğru denklemleri ilk ilkelerden yola çıkarak bulur. Sarkacın nasıl çalıştığını bilir, yaylar hakkında da bilgisi vardır. Ondan sonra, elinden geliyorsa denklemleri çözer. Biyolog ise bunun tam aksine, sadece belirli bir hayvan popülasyonunu düşünerek duruma en uygun denklemleri çıkarmaya kalkıştığı takdirde asla sonuca varamaz. Önce ihtiyaç duyduğu verileri toplaması ve aradığı çıktılara benzeyen çıktıları daha önce sağlamış olan denklemler bulmaya çalışması gerekir. Bin tane balığı alıp içindeki gıda miktarı sınırlı olan bir havuza koyarsanız ne olur? Aynı havuza ayrıca, günde iki balık yemekten zevk alan elli tane köpekbalığı getirirseniz ne olur? Belirli bir hızla öldüren ve nüfusun yoğunluğuna bağlı olarak belirli bir hızla yayılan bir virüse ne olur? Bilim adamları kesin formüller uygulayabilmek amacıyla bu gibi sorular sorarak birtakım ideal durumları tasvir etmişlerdir.

Çoğu zaman başarılı olmuşlardır. Popülasyonlar biyolojisi hayatın tarihi, avcı hayvanların avlarıyla nasıl etkileşim sağladığı, bir ülkenin nüfus yoğunluğundaki değişikliğin bir hastalığın yayılmasını nasıl etkilediği gibi konularda epeyi bilgi sahibi olmuştur. Belirli bir matematiksel modelin çalıştırılması sırasında büyüme, dengeye kavuşma ya da yok olma gibi sonuçlar çıkarsa çevre bilimciler buna bakarak, gerçek hayattaki popülasyonların veya salgın hastalıkların hangi durumlarda aynı şeyleri yapabileceği hakkında bazı sonuçlara varabilir.

Dünyayı ayrı ayrı zaman aralıkları itibariyle modelleyerek işe yarar bir sadeleştirme yapmak mümkündür; bu modelde saatin kolu devamlı olarak kayacağı yerde, saniyeden saniyeye sıçrayarak ileri gitmektedir. Diferansiyel denklemler zaman içinde düzenli bir süreklilikle değişen süreçleri tanımlarlar, ancak diferansiyel denklemler pek hesaba kitaba gelmez. Basit denklemler - "fark denklemleri" - bir halden başka bir hale atlayarak giden süreçler için kullanılabilir. Neyse ki, hayvan popülasyonlarının birçoğu yapacakları şeyi tam birer yıl aralıklarla yaparlar. Çoğunlukla görüldüğü gibi, yıldan yıla fasılalarla meydana gelen değişiklikler devamlılık içinde meydana gelen değişikliklerden daha fazla önem taşır. Mesela böceklerin birçoğu, insanların aksine, üremelerini tek bir mevsime sığdırarak kendilerinden gelecek nesillerin üst üste çakışmamasını sağlar. Gelecek yılın ilkbahar mevsimindeki güve popülasyonunu ya da gelecek kışın kızamık salgınını tahmin etmek isteyen bir çevre bilimci, ilgilendiği konu hakkındaki bu yılın rakamlarını bilse yeterli olur. Yıldan yıla tekrarlanan olaylara ilişkin tabloya bakan bir bilim adamı, o sistemin içindeki karmaşıklığın ancak bir gölgesini görebilir, fakat yapacağı gerçek uygulamaların birçoğu için ihtiyaç duyduğu bilgileri de gene bu gölgeden çıkaracaktır.

On Emir, Talmud'a* ne kadar benziyorsa çevre bilimin matematiği de Steve Smale'in matematiğine o kadar benzer: Çalışma kuralları olarak iyi bir küme teşkil ettiği söylenebilir, içinde pek karmaşık bir şey de yoktur. Biyologlar, her yıl değişen br popülasyonu tanımlamak için lise öğrencilerinin bile kolaylıkla takip edebileceği formel kuralları kullanırlar. Farzedelim ki gelecek yılın güve popülasyonunu tamamen bu yılın popülasyonu belirleyecek olsun. Gözünüzün önüne

*On emir, insanın Tanrıya karşı görevlerini özetleyen Tanrı emirleridir;Kitabı Mukaddes'in Tevrat (Eski Ahit) Kitabındaki çıkış Bahsinde (20:1-17) yer alan bu emirler Tanrı tarafından Musevi şeriatını kuran Musa Peygambere verilmiş olmasına rağmen esas itibariyle Hıristiyan iman ve ahlâkının özünü ifade etmektedir. Talmud ise Musevilerin kanun ve tefsir kitabıdır. (ç.n.)

bu duruma özgü bütün ihtimalleri içeren bir tablo getirin: bu yılın 31.000 güvesi gelecek yılın 35.000 güvesi demektir, vesaire gibi. Yahut bu yılın bütün rakamları ile gelecek yılın bütün rakamları arasındaki ilişkiyi bir kural - bir fonksiyon olarak belirleyebilirsiniz. Gelecek yılın popülasyonu (x) bu yılın popülasyonunun bir fonksiyonudur (F). Böylece: $x_{sonraki} = F(x)$ olur. Her fonksiyon bir grafik üzerinde gösterilebilir ve hemen genel şekli hakkında bir fikir verir.

Yukarıda anlatılan gibi basit bir modelde, bir popülasyonun zaman içinde izlenmesinde asıl olan şey, başlangıç noktası olarak bir sayıyı almak ve aynı fonksiyonu tekrar tekrar uygulamaktır. Popülasyonun üçüncü yılda nerede olacağını görmek için elinizdeki fonksiyonu ikinci yılın sonuçlarına tatbik edersiniz, daha sonraki yıllar için de aynı işlemi tekrarlarsınız. Böylece bahis konusu popülasyonun bütün tarihini, bu fonksiyonel iterasyon süreci sayesinde görmeniz mümkün olur ki, bir feedback sarmalı olan bu süreçte her yılın çıktısı bir sonraki yıl için girdi teşkil eder. Feedback'in kontroldan çıkması mümkündür: Bir hoparlörden çıkan sesin bir mikrofon vasıtasıyla geri beslenmesi ve kulakları yırtan bir cayırtı halinde süratle yükseltilmesi örneğinde olduğu gibi. Yahut feedback istikrar sağlar: Termostatın bir evin sıcaklığını düzenlemesi örneğindeki gibi, tespit edilen bir noktanın üzerine çıkan sıcaklık soğutma mekanizmasını, noktanın altına düşen sıcaklık ise ısıtma mekanizmasını harekete geçirir.

Çok değişik türde fonksiyonlar vardır. Popülasyonlar biyolojisi alanına peşin hükümsüz bir yaklaşımla eğilerek, nüfusu her yıl belirli bir yüzde ile arttıran bir fonksiyonu esas alabiliriz. Bu lineer bir fonksiyon olacak - $x_{sonraki} = rx$ - ve Malthus'un, gıda miktarı ya da moral baskıların sınırlamalarına tabi olmayan klasik nüfus artışı şemasına uyacaktır. "r" parametresi nüfus artış hızını göstermektedir. Diyelim ki, bu değer 1.1 olsun; o takdirde, bu yıl nüfus 10 ise gelecek yıl 11 olacaktır. Girdi miktarı 20.000 ise çıktı miktarı 22.000'dir.

Nüfus, mürekkep faizli bir vadeli hesaba yatırılıp sonsuza kadar bekletilen para gibi, hiç durmadan artar.

Daha çok yıllar önce, çevre bilimciler daha iyi birşeyler yapmaları gerektiğinin bilincine varmışlardı. Gerçek bir havuzun içinde gerçek bir balık tasavvur eden bir çevre bilimci öyle bir fonksiyon bulmalıdır ki, bu fonksiyon hayatın acı gerçeklerine de, mesela açlık ya da mücadele gerçeğine uygun düşmelidir. Balıklar üreyip sayıları artınca aç kalmamak için yiyecek derdine düşerler. Küçük bir balık popülasyonu hızla çoğalır. Biraz fazla kalabalık bir balık popülasyonu küçülür. Ya da Japonya'daki hamam böceklerini alın. Her Ağustos ayının birinci günü bahçenize gidip hamam böceklerini sayın. İşlemi basite indirgemek için kuşları yok farzedin, hamam böceklerine bulaşan hastalıkları yok farzedin ve sadece sabit miktarda yiyecek bulunduğunu varsayın. Böceklerden birkaç tanesi üreyip çoğalacak; çoğunluk ise bahçeyi talan edip var olan bütün bitkileri tükettikten sonra açlıktan ölecektir.

Malthus'un sınırlanmamış artış senaryosunda lineer artış fonksiyonu yukarıya doğru sonsuza dek yükselir. Daha gerçekçi bir senaryo yaratmak isteyen çevre bilimciler için gerekli olan denklem, nüfus arttığı zaman artışı sınırlayan ek bir parametre daha içermelidir. Seçilebilecek en tabii fonksiyon öyle belirlenmelidir ki, nüfusun az olduğu zamanlar nüfusu hızla yükselten, ara değerlerde artış hızını sıfıra yakın bir değere indiren, nüfus miktarı çok büyüdüğü zamanlarda da hızla aşağıya çeken bir fonksiyon olmalıdır. Çevre bilimci, bu sürecin tekrarlanarak nüfusun uzun süreli bir davranış biçiminde karar kıldığını ve muhtemelen düzenli bir hale eriştiğini gözlemleyebilir. Çevre bilimcilerin matematik alanına başarılı bir çıkartma yapıp şöyle bir hükme varmaları mümkündür: İşte size bir denklem; işte size üreme hızını gösteren bir değişken; işte size tabii ölüm hızını gösteren bir değişken; işte size açlık ya da avlanma dolayısıyla vuku bulan ilave ölümleri gösteren bir değişken; şimdi bakın - nüfus şu seviyede denge buluncaya kadar *şu* hızla artacaktır.

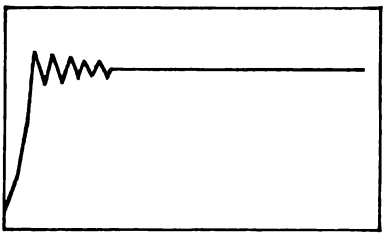
Böyle bir fonksiyonu nasıl bulursunuz? Birçok değişik denklem işinize yarayabilir; belki de en basiti Malthus'un lineer denkleminin değiştirilmiş şeklidir: $x_{sonraki} = rx\ (1\text{-}x)$. Burada da "$r$" parametresi yüksek veya düşük tutulabilecek bir artış hızını temsil etmektedir. Yeni değer olan $1\text{-}x$, artışın sınırlı kalmasını sağlamaktadır, çünkü x arttıkça $1\text{-}x$ düşer.* Eline hesap makinesi alan herkes bir başlangıç değeri seçebilir, bir büyüme hızı seçebilir ve gelecek yılın nüfusunu türetecek aritmetik işlemini yapabilir.

1950'li yıllara kadar,[4] çevre bilimcilerden birçoğu lojistik fark denklemi adıyla bilinen bu özel denklemin değişik şekillerini araştırdılar. Mesela Avustralya'da, W. E. Ricker bu denklemi gerçek balık üretme çiftliklerinde uyguladı. Çevre bilimciler artış hızını gösteren "r" parametresinin modelin önemli özelliklerinden birini oluşturduğunu anladılar. Bu denklemlerin kaynağını teşkil eden fiziksel sistemlerde, bu parametre ısı miktarına veya sürtünme miktarına ya da ortalığı karıştıran başka bir nicelik miktarına tekabül ediyordu. Kısacası, nonlineerlik miktarına. Bir havuz bahis konusu olduğunda, bu parametre balıkların üretkenliğine, sadece

*Kolaylık sağlamak üzere, aşırı derecede soyutlanmış olan bu modelde, "nüfus" sıfır ile bir arasındaki bir kesir olarak ifade edimiştir; sıfır tükenmeyi, bir havuzda tasavvur edilebilecek en büyük popülasyonu göstermektedir.

Şöylece başlayabilirsiniz: r için rasgele bir değer seçin, mesela 2.7 olsun; başlangıçtaki nüfus da .02 olsun. Bir eksi .02 bize .98 verir. Bunu 0.02 ile çarparsanız .0196 bulursunuz. Bunun da 2.7 ile çarparsanız .0529 bulursunz. çok küçük bir sayı ile başlayan nüfus böylece iki katından fazla artmıştır. Süreci tekrarlayın, yeni nüfusu başlangıç değeri olarak alırsanız .1353 bulursunuz. Programlanabilen ucuz bir hesap makinesiyle, bu tekrarlama işlemini sadece bir düğmeye tekrar tekrar basarak yapabilirsiniz. Nüfus .3159'a, daha sonra .5835'e, daha sonra .6562'ye, yükselecektir; artış hızı yavaşlamaktadır. Bundan sonra, açlık dolayısıyla meydana gelen ölümler üremenin yerini alınca .6092. Daha sonra .6428, daha sonra .6199, daha sonra .6362, daha sonra .6249. Sayılar bir ileri bir geri sıçrar gibi görünmekte, ancak sonunda sabit bir rakamda karar kılmaktadır: .6328, .6273, .6312, .6285, .6304, .6291, .6300, .6294, 6299, .6295, .6297, 6296, .6297, .6296, .6296, .6296, .6296, .6296, .6296, .6296, Yaşasın!

Aritmetiğin kalem ve kâğıtla yapıldığı günlerde; ayrıca kollu hesap makinelerinin kullanıldığı günlerde hesaplama işlemlerinde hiçbir zaman bundandaha ileri gidilmezdi.



Bir popülasyon dengeye kavuşmak için artar, sınırlarından taşar, sonra da azalır.

nüfus patlaması eğilimiyle kalmayıp bunun yanı sıra aşırı nüfus artışına da (kibarca "biyotik potansiyel" denen olaya) tekabül eder. Araştırıcılar bu noktada şu soruyu sormaktadır: birbirinden farklı olan bu parametreler değişen bir nüfusun nihai kaderini nasıl etkilemiştir? Bunun apaçık cevabı şudur: parametre düşük tutulmuş ise ideal şartlar öngörülen bu nüfusun da düşük bir düzeye inmesine neden olacaktır. Yüksek bir değer olarak alınmış bir parametre yüksek düzeyde bir düzenli halin oluşmasına neden olacaktır. Bu sonuçlar birçok parametre bakımından böyledir - ancak hepsi için değil. Ricker gibi araştırıcılar şüphesiz, zaman zaman daha da yüksek parametreler denemiş ve deneyince de zorunlu olarak kaosla karşılaşmışlardır.

Sayı dizileri düzenini şaşırınca ortaya öyle garip bir durum çıkar ki kollu hesap makinesiyle çalışan bir kimsenin aklını oynatmaması mümkün değildir. Tabii ki, ne sayıların artışı sınırsızdır ne de belirli bir seviyede düzenli olarak birleşirler. Ancak, görünen şuydu ki, bu ilk çevre bilimcilerin hiçbirinin, kararlı duruma geçmek bilmeyen sayılar üretmeye hevesi de, takati de yoktu. Bununla birlikte, nüfusun bir geri, bir ileri sıçramaya devam etmesi üzerine, çevre bilimciler olayın temelinde bir denge bulunduğunu ve nüfusun bu dengeye bağlı olarak salındığını varsaymışlardır. Burada asıl önemli olan dengeydi. Çevre bilimciler denge bulunmadığını akıllarının köşesinden bile geçirmemişlerdi.

Gerek lojistik denklemini gerekse bundan daha karmaşık olan benzerlerini konu alan referans kitaplarında[5] ve ders

kitaplarında, bu alanda kaotik davranış biçimi doğması ihtimali bulunduğundan hiç bahis yoktu. J. Maynard Smith, 1968'de yayınladığı *Biyolojide Matematiksel Görüşler* adlı klasikleşmiş eserinde, ihtimaller üzerinde standart bir değerlendirme yaptı: Buna göre, popülasyonlar ya çoğunlukla yaklaşık olarak sabit kalıyor ya da farazi bir denge noktasının etrafında "epeyi düzgün bir periyodisite uyarınca" dalgalanıyorlardı. Smith'in bu düşüncesi, gerçek popülasyonların hiçbir zaman gelişigüzel davranmayacaklarını tasavvur edecek kadar saf olduğundan kaynaklanmıyordu. Sadece, gelişigüzel davranış biçimi ile kendi tanımladığı matematik modeller arasında hiçbir alâka olmadığını düşünmüştü. Her halde, biyologlar bu modelleri yanlarına fazla yaklaştırmamalıydı. Artık modeller, nüfusun gerçekteki davranış biçiminin nasıl olduğu hakkında, bizzat kendilerini yapan kişilerin bilgilerine bile sadık kalmıyorsa ortaya çıkan bu farklılığı izah edebilecek bir gerekçe bulmak her zaman için mümkündü: Mesela, nüfusun yapısı (yaş gruplarının dağılımı), nüfusun bulunduğu mekân ya da coğrafyaya ilişkin birtakım sorunlar veya nüfus içindeki kadın ve erkekleri saymanın yaratacağı kompikasyonlar gibi.

Daha da önemlisi, çevre bilimcilerin aklından[6] hiç eksilmeyen bir varsayıma bakılırsa gelişigüzel seyreden bir sayı dizisi muhtemelen, ya hesap makinesinin bir oyun oynadığı ya da verdiği sonuçlarda hassaslık bulunmadığına işaret ediyordu. Sadece istikrarlı çözümleri ilgilenmeye değer görüyorlardı. Yani düzen, kendi kendisini ödüllendirmiş oluyordu. Bakarsanız duruma en uygun denklemleri bulmak ve hesapları bu denklemleri kullanarak yapmak pek o kadar kolay bir iş değildi. Doğru dürüst ilerlemeyen, sonuçta istikrar üretmeyen bir çalışmayı başlatıp vaktini ziyan etmeye kimsenin niyeti yoktu. İyi bir çevre bilimci, kullandığı denklemlerin gerçek fenomenlerin aşırı derecede basite indirgenmiş bir biçimde ifade edilmesi olduğunu asla aklından çıkarmış değildir. Aşırı basitleştirme yapılırken gözden kaçırılmaması gereken asıl nokta düzenliliğin modellenmesidir. Peki bütün bu eziyeti sırf kaosla karşılaşmak için mi çekmişlerdir?

Daha sonraları, Lorenz'i James Yorke'un keşfettiği ve kaos bilimine de bu adı verdiği söylenmiştir. Gerçekte, bu hikâyenin sadece ikinci kısmı doğrudur.

Yorke, kendisinin filozof olduğuna inanmaktan zevk duyan bir matematikçiydi; aslında bunu kabul etmek mesleki bakımdan tehlikeli sayılırdı. Zeki, sakin konuşan, Steve Smale gibi dağınıklığında zerafet bulunan bir insanın bizzat kendi dağınıklığı da zarif olan bir hayranıydı. O da herkes gibi, Smale'in düşüncelerine nüfuz edebilmekte zorlanmıştı. Yorke, daha yirmi iki yaşındayken Maryland Üniversitesinde, adı The Institute for Physical Science and Technology (Fizik Bilimler ve Teknoloji Enstitüsü) olan enstitüde görev aldı ve sonraları da bu Enstitünün başkanlığına kadar yükseldi. Gerçekliğe ilişkin düşüncelerini uygulama alanına koymaya kendini mecbur hisseden matematikçilerdendi. Bel soğukluğu hastalığının nasıl yayıldığı hakkında hazırladığı bir rapor[7] üzerine ABD Hükümeti bu hastalığı kontrol etmek için ülke çapında uyguladığı stratejileri değiştirmeye karar vermiştir. 1970'li yıllardaki petrol krizi sırasında Maryland Eyaleti makamlarına resmen müracaat ederek petrol satışlarını sınırlamak için kullanılan tek-çift plaka numarası sisteminin[8] sadece kuyrukların daha uzamasına sebebiyet vereceğini doğru (fakat pek de inandırıcı olamayan) bir şekilde ortaya koymuştur. Savaş aleyhtarı gösterilerin moda olduğu bir dönemde, bir gösteri yürüyüşünde heyecanların doruğa çıktığı bir anda bir casus uçağından çekilen ve Washington Anıtı etrafındaki kalabalığın seyrek ve dağınık halini gösteren bir fotoğrafın Hükümet tarafından yayınlaması üzerine, anıtın gölgesini analiz ederek[9] fotoğrafın aslında yarım saat sonra, yürüyüşe katılanların dağıldığı sırada çekilmiş olduğunu ispat etmiştir.

Yorke, Enstitüde, herkese nasip olmayan bir serbestliğe sahip olarak geleneksel alanların dışındaki sorunlar üzerinde çalışabiliyor ve birçok bilim dalındaki uzmanlarla sık sık temas edip görüş alışverişinde bulunabiliyordu. Bunlar arasında akışkanlar dinamiği alanında çalışan bir uzman, Lorenz'in 1963 yılında yayınladığı "Deterministic Nonperiodic Flow" (Pe-

riyodik Olmayan Determinist Akış) başlıklı makalesiyle 1972 senesinde karşılaşmış ve âşık olmuş, her isteyene birer kopyasını dağıtmaya başlamıştı. Bir kopyasını da Yorke'a verdi.

Lorenz'in makalesi[10] Yorke'un o güne kadar arayıp da bulamadığı sihirli değnekti. Birincisi, Smale'in ilk başlarda ortaya attığı iyimser tasnif şemasını ihlâl eden kaotik bir sistem onu tam bir matematik şokuna uğrattı. Fakat sorun sadece matematikle kalmıyordu; fiziksel bir model olarak da o kadar canlıydı ve hareket halindeki bir akışkanın öyle bir resmini ortaya koyuyordu ki, Yorke, bunun fizikçilerin görmesi gereken bir şey olduğunu derhal kavradı. Smale de matematiği bu tür fiziksel problemlere yöneltmişti, fakat Yorke matematik dilinin iletişim sağlamak bakımından ciddi bir engel teşkil ettiğini iyice farkına varmıştı. Keşke akademik âlemde hibrid matematikçi/fizikçilere de bir yer olsaydı - ne yazık ki yoktu. Doğrusu, Smale'in dinamik sistemler konusundaki çalışmaları bu iki alan arasındaki uçurumu kapatmaya başlamıştı, ama matematikçiler bir dil konuşmaya devam ediyordu, fizikçiler ise başka bir dil. Fizikçi Murray Gell-Mann'ın bir zamanlar söylediği gibi, "Matematikçileri iyi birer fizikçi sanan, fizikçileri de iyi birer matematikçi sanan bir insan tipi vardır ki, öğretim üyeleri bunlara çok alışıktır. Aslında, çevrelerinde bu tip insanları görmekten de hiç hazzetmezler."[11] Bu iki bilim dalının normları arasında farklar vardı. Matematikçiler, teoremleri mantıklarıyla kanıtlar; fizikçiler daha elle tutulur kanıtlara başvururlardı. İki tarafın dünyasını meydana getiren nesneler birbirinden farklıydı. Verdikleri örnekler de farklıydı.

Şöyle bir örnek Smale'i mutlu etmeye yetebiliyordu: Bir sayı alın, bu sıfırla bir arasındaki bir kesir olsun, sonra ikiyle çarpın. Sonra tam sayı kısmını, yani virgülün sol tarafındaki kısmı atın. Sonra bu işlemi tekrarlayın. Sayıların çoğu rasyonel olmadığı ve en küçük ayrıntılarına kadar öngörülebilir olmadığı için, bu işlem ancak öngörülebilir olmayan bir sayı dizisi verecektir. Fizikçi açısından burada hiçbir şey ifade etmeyen, gayet basit ve hiçbir işe yaramayacak kadar so-

yut bir matematik garabetinden başka bir şey yoktur. Ancak, Smale bu matematik hilesinin birçok fizik sisteminin bünyesinde bulunduğunu sezmişti.

Fizikçilere göre geçerli olan bir örnek ise, basit şekilde yazılabilen bir diferansiyel denklemdi. Yorke Lorenz'in makalesini gördüğünde, bir meteoroloji dergisinin sayfaları arasında kaybolmuş haliyle bile, bunun fizikçiler tarafından anlaşılabilecek bir örnek olduğunu kavramıştı. Smale'e bir kopyasını vermiş,[12] Smale'in yazıyı geri göndermesi için üstüne de kendi adresi yazılı bir etiket yapıştırmıştı. Bu meteoroloji uzmanının - *daha on yıl önce* - Smale'in bir zamanlar matematiksel açıdan imkânsız sandığı bir kaos türünü keşfetmiş olması Smale'i hayrete düşürmüştü. "Periyodik Olmayan Determinist Akış"ın çok sayıda fotokopisini çekti; Lorenz'i Yorke'un keşfettiği efsanesi de böylece doğmuş oldu. Makalenin Berkeley'de elden ele geçen her kopyasının üzerinde Yorke'nin adres etiketi vardı.

Yorke, fizikçilerin kaosu görmemeyi *öğrendikleri* kanaatindeydi. Günlük hayatta, Lorenz'in ortaya çıkardığı başlangıç şartlarına hassas bağımlılık her yerde saklı durumda bulunuyordu. Adam sabah evinden otuz saniye geç çıktığı için, saksı birkaç milimetre farkla başına düşmez, ancak daha sonra bir kamyonun altında kalabilir. Ya da, bu kadar kötü örnek vermeyelim, her on dakikada bir geçen otobüsü kaçırmaktadır; bu otobüs de onu her saat başı geçen trene yetiştiren vasıtadır. İnsanın bir gün içinde izlediği güzergâhtaki küçük pertürbasyonların büyük olumsuz etkileri olabilmektedir. Beyzbol santimetrelerin* önem taşıdığı bir oyun olduğu için, topa vuran bir oyuncu sopasını her sallayışında hemen hemen aynı sonucu elde edemeyeceğini bilir. Oysa, bilimde durum bundan farklıdır.

Pedagojik bir yaklaşımla, fizik ile matematik uygun ölçülerde birbirine karıştırılarak bir kara tahtaya diferansiyel denklemler yazılıyor ve öğrencilere bunların nasıl çözüleceği gösteriliyordu; bu şimdi de yapılmaktadır. Diferansiyel denklemlerde gerçek, bir yerden bir başka yere ve bir zamandan

*İngilizce metinde 'inç' - uzunluğu 2,54 cm olan bir İngiliz uzunluk ölçü birimi. (ç.n.)

bir başka zamana düzenli bir değişim içinde olan, ayrı ayrı noktalarla ya da zaman aşamalarıyla kesilmeyen bir devamlılık şeklinde tanımlanır. Bilimsel çalışma yapan her öğrenci diferansiyel denklem çözmenin zor bir iş olduğunu bilir. Ne var ki, iki buçuk asır boyunca, bilim adamları denklemler hakkında muazzam bir bilgi birikimi sağlamışlardır: diferansiyel denklemlere ait el kitapları ve kataloglar, bunların çözümlenmesi, ya da bir bilim adamının söylediği gibi, "kapalı bir entegral formu bulunması" için geliştirilmiş çeşitli metotlarla at başı gitmektedir. Ortaçağdan sonra bilimde kaydedilen somut başarıların kökeninde analizdeki bu gelişmelerin bulunduğunu ve etrafındaki dünyayı değişebilir özellikleriyle birlikte modellemeye gayret eden insanoğlunun en dahiyane buluşlarından birini teşkil ettiğini söylersek gerçeği hiç de abartmış olmayız. Bu itibarla, bir bilim adamı tabiata bakış açısını bu şekilde geliştirip teori ile gerçeğin, zorlu gerçeğin arasında kolaylıkla dolaşmaya başladığında, bir olguyu gözünden kaçırma tehlikesi de vardır. Diferansiyel denklemlerden birçoğunun çözülmesi kesinlikle mümkün değildir.

Yorke bunu şöyle ifade etmiştir: "Bir diferansiyel denklemin çözümünü yazabiliyorsanız bu denklem mutlaka kaotik bir denklem değildir, çünkü bunu yazabilmek için birtakım düzenli sabit değerler, açısal moment gibi saklanabilen şeyler bulmak zorundasınız. Zaten bunu yapabiliyorsanız kaos ihtimalini de ortadan kaldırmışsınız demektir."[13]

Çözümü bulunan sistemler ders kitaplarında anlatılan sistemlerdir. Bunlar nasıl davranılması gerekiyorsa öyle davranırlar. Nonlineer bir sistemle karşılaşan bilim adamları ya bunun yerine yaklaşık lineer sistemler ikame etmeli ya da başka bir belirsiz kapıdan yol bulup girmeyi denemelidir. Ders kitaplarında öğrencilere sadece, bu gibi teknikleri bulmalarını sağlayan ve nadir rastlanan nonlineer sistemler anlatılmıştır. Bunlarda başlangıç durumuna hassas bağımlılık ortaya konmamıştır. Gerçek kaosu içeren nonlineer sistemler nadiren öğretilmiş ve nadiren öğrenilmiştir. İnsanlar bu gibi şeylerle karşılaştıklarında - mutlaka da karşılaşmışlardır - aldıkları eğitimin etkisiyle gösterdikleri tepki bunları sap-

kınlık olarak reddetmekten ibarettir. Pek az kimse çözülebilir, düzenli, lineer sistemlerin sapkınlık olduğunu hatırlayabilmiştir. Yani, doğanın kendi doğasının ne kadar nonlineer olduğunu[14] anlayanların sayısı pek azdır. Enrico Fermi bir keresinde şöyle demişti: "İncil'de bütün doğa kanunlarının lineer olarak ifade edilebileceği yazılı değildir!"[15] Matematikçi Stanislaw Ulam da kaosun incelenmesi konusuna "nonlineer bilim" adını vermenin, zoolojiye "filden gayri hayvanların incelenmesi"[16] demekten farksız olduğunu belirtmiştir.

Yorke artık biliyordu. "İlk mesaj düzensizliğin var olduğudur.[17] Fizikçiler ve matematikçiler düzenlilikleri keşfetmek arzusundadırlar. İnsanlar düzensizliğin ne işe yaradığını merak eder. Ancak insanlar düzensizlikle meşgul olup ondan yararlanacaksa düzensizliğin ne olduğunu da bilmeleri gerekir. Supapların üstündeki neden tortu biriktiğini bilmeyen motor tamircisine iyi tamirci denemez." Yorke'a göre, gerek bilim adamları gerekse bilimle ilgisi olmayanlar karmaşık durumlara gerektiği gibi uyum sağlamış değillerse bu konuda kolaylıkla yanılmaları ihtimali vardı. Yatırımcılar neden israrla, altın ve gümüş fiyatlarında devreler mevcut olduğunu iddia ederler? Çünkü periyodiklik tasavvur edebilecekleri düzenli davranış biçimleri arasında en komplike olanıdır. Karmaşık bir fiyat şekli gördükleri zaman, orada, ufacık bir gelişigüzel gürültüyle karışık biraz periyodiklik aranırlar. Fizik, kimya ya da biyoloji dallarında bilimsel deneyler yapanlar da bunlardan pek farklı değildir. Yorke şunu diyordu: "Geçmişte, insanlar sayılamayacak kadar çok vesile ile kaotik davranış biçimleri görmüşlerdir. Bunlar, bir fizik deneyi yaparlar; bu sırada, deneyde ne tarafa gittiği belli olmayan gelişigüzel bir davranış biçimi ortaya çıkar. Bunu düzeltmeye kalkarlar ya da vazgeçip bırakırlar. Bu gelişigüzelliğin açıklaması olarak, ya gürültü olduğunu ya da deneyin bozulduğunu söyleyip işin içinden çıkarlar.

Yorke, Lorenz ve Smale'in çalışmalarında fizikçilerin bir türlü alamadıkları bir mesaj bulunduğu kanısına vardı. Bunun üzerine, en geniş çapta dağıtımı olan bir yayın olarak, the *American Mathematical Monthly* dergisinde yayımlat-

mak düşüncesiyle bir makale kaleme aldı. (Yorke matematikçi olduğu için, fikirlerini, fizik dergilerinin kabul edebileceği bir biçimde ifade etmekte aciz kaldığını hissediyordu; fizikçilerle işbirliği yapma maharetini ancak yıllar sonra gösterebilmiştir.) Yorke'un makaleyi[18] yazdığına değmişti, ama gene de insanları en fazla etkileyen tarafı kurnazca düşünülmüş esrarengiz başlığıydı: "Period Three Implies Chaos" (Kaos Üçüncü Periyotta Saklanır.) Meslektaşları Yorke'a daha makul bir şey seçmesini tavsiye ettilerse de Yorke kapsamı gittikçe genişleyen determinist düzensizlik araştırmalarını simgeleyecek bir kelimeyi kullanmaktan vazgeçmedi.

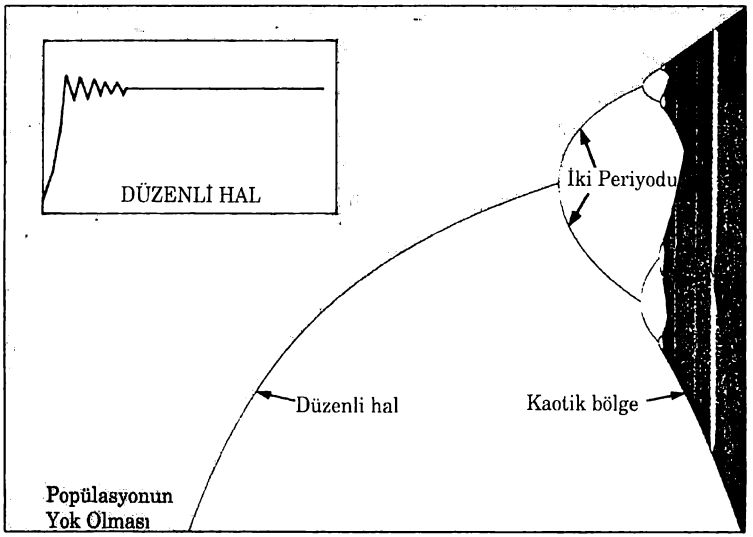
May biyolojiye, öylesine arka kapıdan girmiştir.[19] Başarılı bir avukatın oğluydu; Avustralya'nın Sydney şehrinde doğmuş ve meslek hayatına teorik fizikçi olarak başladı; doktora üstü çalışmalarını uygulamalı matematik dalında Harvard'da yaptı. 1971'de bir yıl Princeton'daki The Institute for Advanced Study'ye (Yüksek Araştırmalar Enstitüsü) devam etti; ancak, orada yapması gereken çalışmaları yapacağı yerde, vaktinin büyük bir kısmını Princeton Üniversitesindeki biyologlarla konuşarak geçirmekteydi.

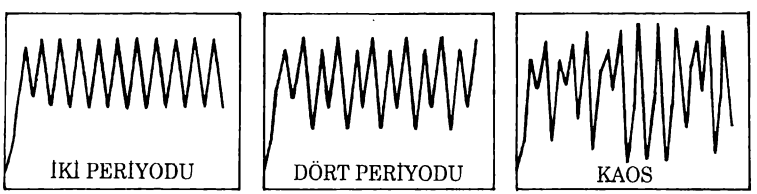
Biyologların matematikle ilgileri, bugün bile, analizin ötesine gitmez. Matematiği seven ve matematiğe yatkınlığı olan kimseler, matematikle fiziğe tabii bilimlerden daha çok sempati duyarlar. May ise bunun bir istisnasını teşkil ediyordu. Başlangıçta ilgi duyduğu konular istikrar ve karmaşıklık, birbirleriyle mücadele eden türlerin bir arada yaşamalarını sağlayan şartların matematiksel açıklamaları gibi soyut problemlerdi. Kısa bir süre sonra, bütün dikkatini, münferit popülasyonların zaman içindeki davranış biçimleri gibi en basit ekoloji sorunları üzerinde toplamaya başladı. Başka türlü olamayacağı için basit olmak zorunda olan modelleri artık bir uzlaşmanın ifadesi olarak görmüyordu. Princeton Fakültesinde araştırıcı olarak göreve başladığında - sonunda Üniversitedeki araştırma bölümünün dekanlığına yükselecektir - lojistik fark denkleminin değişik bir versiyonu üzerinde saatlerce çalışma yapmış ve bunun için de sadece matematiksel analiz ile basit bir hesap makinesi kullanmıştı.

Bu denklemi, daha önce de, Sydney'deki Üniversitede, lisansüstü öğrencilerine anlatmak için koridorların birindeki bir kara tahtaya yazmıştı. Bu denklem artık canını sıkmaya da başlıyordu. "Hay Allah! Lambda birikim noktasını geçerse ne olur ki?"[20] Ne olacağı, bir nüfusun artış hızı kritik noktayı geçtiğinde, nüfus patlaması ve aşırı nüfus artışına doğru yöneleceği demekti. May, bu nonlineer parametre için değişik değerler tanımlayıp problemi çözmeye çalışırken, sistemin karakterini tamamen değiştirebileceğini keşfetti. Parametrenin değerini yükseltmek demek nonlineerlik derecesini yükseltmek anlamına geliyor, bununla da sadece çıktı miktarı değil, çıktı kalitesi de değişiyordu. Bu işlem sadece nüfusun nihai dengesi değil, nüfusun bir dengeye kavuşup kavuşmayacağını belirliyordu.

Parametre küçük bir değerde iken May'in basit modeli düzenli bir halde karar kılıyordu. Parametrenin değeri yükseldiğinde düzenli hal bozuluyor ve nüfus iki almaşık değer arasında salınmaya başlıyordu. Parametrenin değeri çok yüksek ise sistemin - *hem de o aynı sistemin* - davranış biçimi öngörülemez bir hale dönüşüyordu. Niçin? Farklı davranış biçimlerini birbirinden ayıran sınırlarda gerçekte neler olmuştu? May bir türlü bu sorunun içinden çıkamamıştı (Aslında lisansüstü öğrencileri de çıkamamıştı).

May, en basit denklemlerden biri olan bu problemin gösterdiği davranış biçimleri üzerinde yoğun bir sayısal araştırma çalışmasına girdi. Uyguladığı program Smale'in programına benziyordu: bu basit denklemi dar çerçevede değil, global çerçevede, bir *blok* halinde kavramayı hedefliyordu. Bu denklem Smale'in o güne kadar incelediği bütün sorunlardan çok daha basitti. Denklemin düzen ve düzensizlik yaratma ihtimallerinin uzun zamandan beri enine boyuna araştırılmamış olması akıl alacak şey değildi. Gerçekten de araştırılmamıştı. Bu işe May'in programıyla başlanmış oluyordu. May, parametreye yüzlerce değişik değer vererek neler çıktığını araştırmaya girişti; feedback sarmalını harekete geçirip





PERİYOTLARIN İKİ KATINA ÇIKMASI VE KAOS. Robert May ve diğer bazı bilim adamları birbirinden farklı doğurganlık oranlarına sahip popülasyonların davranış biçimini göstermek üzere ayrı ayrı grafikler kullanmak yerine, bütün bilgileri tek bir resimde toplayabilmek için bir "dallanma grafiği" kullanmışlardır.

Yukarıdaki grafikte, bir parametredeki - bu örnekteki parametre, bir yabani hayvan popülasyonundaki nüfus "patlaması ve aşırı nüfus artışı"dır - değişikliklerin bu basit sistemin nihai davranış biçimini nasıl değiştirebileceğini göstermektedir. Parametrenin değerleri soldan sağa doğru gösterilmiştir; nihai nüfus dikey eksende işaretlenmiştir. Parametrenin değerini yükseltmek, bir bakıma, sistemi daha zor hale getirmek, nonlineerliğini arttırmak anlamına gelmektedir.

Parametrenin düşük olduğu yerlerde (solda), popülasyon yok olmaktadır. Parametre yükselişe geçtiğinde (ortada) popülasyonun dengesi de daha yüksek bir düzeyde oluşmaktadır. Ondan sonra, parametre daha da arttıkça, denge ikiye bölünmekte ve tıpkı konveksiyon halindeki bir akışkanın taşıdığı ısı artırıldığı zaman ortaya istikrarsızlık çıkması durumuna benzemektedir. Bölünmeler ya da çatallaşmalar gittikçe daha hızlanmaktadır. Daha sonra sistem kaotik hale gelmekte (sağda) ve popülasyonun gidip geldiği değerlerin sayısı sonsuz olmaktadır (Kaos bölgesinin daha büyütülmüş bir şekli bu bölümdeki diğer resimlerde görülmektedir.)

sayı kümelerinin hangi sabit noktada karar kıldıklarını, - ya da karar kılıp kılmadıklarını - inceledi. Bütün dikkatini kararlılık ile salınım arasındaki kritik sınırın üzerinde teksif etti. Sanki kendi balık havuzunda, balıkların "nüfus patlaması ve aşırı nüfus artışı" durumunu büyük bir beceri ile yönetiyor gibiydi. May, gene $x_{sonraki} = rx\ (1-x)$ lojistik denklemini kullanarak parametrenin değerini mümkün olabilecek en yavaş şekilde yükseltti. Parametre 2.7 iken nüfus .6292 oluyordu. Parametre yükseldikçe nihai nüfus da yavaşça artıyor ve grafiğin solundan sağına doğru ilerlerken yavaşça yükselen bir eğri çiziyordu.

Bu arada, aniden, parametre 3'ü geçince, çizgi ikiye ayrıldı. May'in hayali balık popülasyonu tek bir değerde karar kılmayı reddetmiş, bir yıldan öbür yıla geçişte iki nokta arasında salınmaya başlamıştı. Nüfus düşük bir sayıdan başlayıp artıyor, sonra düzenli bir şekilde ileri geri vuruncaya kadar dalgalanıyordu. Düğmeyi biraz daha yukarı kaldırınca - parametreyi birazcık daha yükseltince - salınım tekrar bölünüyor, böylece elde edilen sayı kümesi dört değişik değerde karar kılıyor ve bunların her biri dört yılda bir geri dönüyordu.* Şimdi popülasyon dört yıllık düzenli bir program dahilinde yükseliyor ve düşüyordu. Devre tekrar ikiye katlanmıştı - önce yıllık iken sonra iki yıllık şimdi de dört yıllık olmuştu. Sonuçta ortaya çıkan çevrimsel hareket biçimi bu kez de istikrarlıydı; popülasyona verilen çıkış değerleri farklı olmakla birlikte, bunlar aynı dört yıllık dönemde birleşiyordu.

Lorenz'in on yıl önce keşfettiği gibi, bu sayıları doğru dürüst yorumlamanın ve gözünü bozmadan bunlara bakabilmenin tek yolu bunu bir diyagram haline getirmekti. May,

*Mesela 3.5 değerindeki bir parametre ve .4 değerindeki bir başlangıç noktası aldığında, aşağıdaki şekilde bir sayı kümesi görecekti: .4000, .8400, .4704, .8719,
.3908, .8332, .4862, .8743,
.3846, .8284, .4976, .8750,
.3829, .8270, .4976, .8750,
.3829, .8270, .5008, .8750,
.3828, .8269, .5009, .8750,
.3828, .8269, .5009, .8750, v.s.

böyle bir sistemin farklı parametrelere göre göstereceği davranış biçimlerine ilişkin bütün mevcut bilgileri bir araya toplayıp ana hatlarıyla belirleyecek bir taslak çizdi. Parametrenin düzeyini soldan sağa doğru yükselen yatay bir eğriyle gösteriyordu. Popülasyon dikey olarak gösterilmişti. May her parametre için, sistem dengeye kavuştuktan sonraki nihai çıktıyı gösteren bir noktanın yerini işaretledi. Parametrenin düşük olduğu sol tarafta bu çıktı sadece bir noktadan meydana geliyor, böylece farklı parametreler soldan sağa doğru hafifçe yükselen bir eğri oluşturuyordu. Parametre birinci kritik noktayı geçtiğinde, May iki popülasyon çizmek durumunda kaldı: eğri ikiye ayrılıyor, yatık bir Y harfi ya da bir çatal şeklini alıyordu. Bu bölünme bir yıllık devreden iki yıllık devreye geçen bir popülasyona tekabül ediyordu.

Parametre daha da yükseldikçe, noktaların sayısı tekrar iki kat artıyor, sonra tekrar, tekrar artıyordu. Öyle bir davranış biçimi ki, hem kompleks olsun hem de insanın hevesini kursağında bırakacak kadar düzenli olsun, akıl alacak şey değildi. May buna "matematiğin içindeki gizli düşman" diyordu. Her iki kat artış yeni bir dallanma, her dallanma da tekrarlanma paterninin bir kere daha bozulması demekti. İstikrarlı durumda bulunan bir popülasyon her iki senede bir farklı düzeyler arasında bir o yana bir yana gidip geliyordu. İki yıllık bir devrede gidip gelmekte olan bir popülasyon şimdi üçüncü ve dördüncü yıllarda değişiyor, böylece dört periyoduna geçiyordu.

Bu dallanmalar gittikçe daha da hızlanıyor - 4, 8, 16, 32 . . . - ve sonra birdenbire kayboluyordu. Belirli bir noktadan, "birikim noktası"ndan sonra periyodiklik kaosa yerini kaosa, hiçbir zaman kararlı hale geçmeyen dalgalanmalara terkediyordu. Diyagramın büyük bir kısmı tamamen kararmıştı. Bu basit nonlineer denklemlerin hükmettiği bir hayvan popülasyonunu izliyorsanız nasıl çevredeki gürültü yüzünden etrafa kaçışıyorlarsa yıldan yıla vuku bulan değişikliklerin de mutlak olarak gelişigüzel olduğunu düşünebilirsiniz. Oysa bu karmaşıklığın tam orta yerinde istikrarlı devreler birdenbire tekrar ortaya çıkar. Parametre yükseldiği sırada, yani sis-

temdeki nonlineerliğin şiddetini daha da arttırdığı anda bile, aniden düzenli periyodu olan bir pencere görünecektir: bu 3 ya da 7 gibi tek sayılı periyottur. Nüfusun değişme şekli üç yıllık ya da yedi yıllık devrelerle tekrarlanmaktadır. Bunun arkasından periyodu ikiye katlayan Dallanmalar yeni baştan daha hızlı bir ritimle tekrar başlamakta, 3, 6, 12 . . . ya da 7, 14, 28 . . . devrelerinden hızla geçmekte, sonra da yeniden ortaya çıkan kaos içinde bir kere daha yok olmaktadır.

May ilk başta bu resmin tamamını görememişti. Fakat hesaplayabildiği kadarıyla gördüğü resim parçaları insanın moralini bozmaya yetiyordu. Gerçek dünyadaki bir sistemde, araştırıcı sadece, parametrenin tek bir değerine tekabül eden dikey dilimi görebiliyordu. Yalnız bir davranış biçimi görmesi mümkündü - muhtemelen düzenli bir hal, muhtemelen yedi yıllık bir devre, muhtemelen apaçık gelişigüzellik gibi. Parametrelerin birinde küçük bir değişiklik yapılması halinde, aynı sistemin ortaya tamamen değişik tipte şekiller çıkarabileceğini bilmesine imkân yoktu.

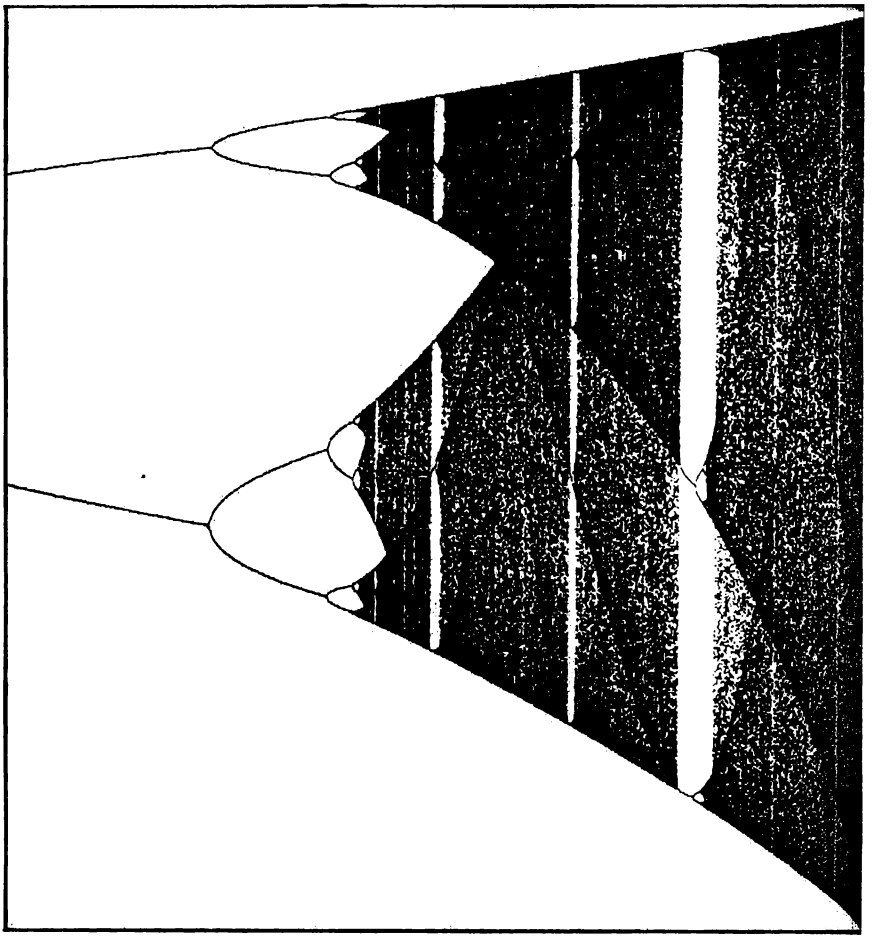
James Yorke bu davranışın analizini, matematiğin bütün kesinliğini kullanarak "Kaos Üçüncü Periyotta Saklanır" başlıklı makalesinde yaptı. Tek boyutlu *herhangi bir* sistemde düzenli bir üç periyodu devresi ortaya çıkarsa aynı sistemde hem bunun dışında her uzunlukta düzenli devreler hem de tamamen kaotik devreler bulunacağını da ispat etti. Bu buluş, Freeman Dyson gibi fizikçilerde adeta "elektrik çarpmış" gibi bir etki yaratmıştır. Çünkü sezgileri bunun tam aksini söylüyordu. Üç periyodu salınımında kendini tekrarladığı halde hiç kaos üretmeyen bir sistem kurmak size gereksiz görünebilir. Yorke bunun imkânsız olduğunu ispat etmişti.

İnsana şaşırtıcı gelebilir ama,[21] Yorke, makalesinin halkta uyandırdığı ilginin matematiksel değerinden daha fazla olduğu kanısındaydı. Bu görüşü kısmen de doğru sayılabilirdi. Birkaç yıl sonra, Doğu Berlin'de bir konferansa katıldığı sırada, biraz da şehri gezmeye vakit ayırıp Spree nehrinde bir gemi turu yaptı. O sırada birdenbire yanında biten bir Rus ona aceleyle bir şeyler anlatmaya çalıştı. Yorke, bir Polonyalı arkadaşının yardımıyla, sonunda Rusun aynı sonuca var-

dığını kendisine ispat etmeye çalıştığını anladı. Rus daha fazla açıklama yapmaktan kaçındı ve makalesini göndereceğini söylemekle yetindi. Dört ay sonra makale geldi. A. N. Sarkovskii'nin gerçekten de elini Yorke'tan daha çabuk tuttuğu "Bir Doğrunun Kendi Üzerine Sürekli Dönüşümüne İlişkin Çevrimlerin Bir Arada Bulunması" başlıklı makalede görülüyordu. Ancak, Yorke'un makalesi sadece matematiksel bir sonuçtan ibaret değildi. Fizikçilere hitaben de bir mesaj içeriyordu: Kaos her yerde ve her zaman hazırdır; istikrarlıdır; bir yapısı vardır. Hatta, ileri sürdüğü gerekçeler, geleneksel olarak, zor çözümlenen sürekli diferansiyel denklemlerle modellenen karmaşık sistemlerin ayrı ayrı ve basit uygulamalar itibariyle kavranabileceğini kanıtlıyordu.

Aradığını bulamamış birtakım matematikçilerin nehir turunda karşılaştıklarında birbirleriyle heyecanlı heyecanlı konuşmaları, Sovyet bilim adamlarıyla Batılı bilim adamları arasında sürekli bir iletişim kopukluğu bulunduğunun açık bir göstergesiydi. Kısmen dil sorunu yüzünden kısmen de Sovyet tarafındaki seyahat kısıtlamaları dolayısıyla Batının sofistike bilim adamları çoğu zaman, Sovyet literatürüne daha önce girmiş bulunan çalışmaları tekrar yaptılar. Amerika Birleşik Devletlerinde ve Avrupa'da kaosun filizlenmesi bir taraftan Sovyetler Birliğinde buna paralel olarak yürütülen çalışmalar için ilham kaynağı olurken diğer taraftan da, büyük çapta şaşkınlığa sebebiyet veriyordu, çünkü bu yeni bilim oldukça büyük bir bölümü itibariyle, Moskova için pek o kadar yeni sayılmazdı. Sovyet matematikçileri ve fizikçileri[22] kaos araştırmalarında, A. N. Kolmogorov'un 1950'li yıllardaki çalışmalarına kadar uzanan köklü bir geleneğe sahipti. Üstelik, başka yerlerde matematik ve fizik birbirinden kopmuşken, Sovyetler Birliği'nde bu iki bilim dalı birlikte çalışma geleneğini ayakta tutmayı başarmıştı.

Bu nedenle, Sovyet bilim adamları Smale'in fikirlerini kabul etmekte zorlanmadılar - Smale'in at nalı 1960'lı yıllarda bayağı ses getirmişti. Başarılı bir matematiksel fizikçi olan Yasha Sinai, benzeri sistemleri hızla termodinamik ifadelere çevirdi. Aynı şekilde, Batılı fizikçiler Lorenz'in çalışmalarıyla



KAOS İÇİNDE DÜZEN PENCERELERİ. En basit bir denklemde bile grafiğin çatallaştığı yerdeki kaos bölgesinin karmakarışık bir yapıya - Robert May'ın ilk başta tahmin ettiğinden çok daha düzenli bir yapıya - sahip olduğu anlaşılmaktadır. İlk başta, çatallaşmalar 2, 4, 8, 16'lı . . . . periyotlar meydana getirir. Sonra kaos başlar, düzenli periyotlar ortadan kalkar. Bunun üzerine, sistem daha zora koşulduğu için, tekli periyotlu pencereler belirir. İstikrarlı bir 3'lü periyot ortaya çıkar (sağ üstte, büyütülmüş resim) ve bunun arkasından periyotların ikiye katlanması olayı tekrar başlar: 6, 12, 24 . . . . Yapının sonsuz bir derinliği vardır. Bazı bölümleri büyütüldüğünde (sol altta, 3'lü periyot penceresinin orta parçası gibi) diyagramın bütününü andıran bir şekil ortaya çıkmaktadır.[23]

nihayet 1970'li yıllarda tanıştıkları sıralarda, Lorenz'in adı Sovyetler Birliğinde de yayılmaya başladı. 1975 yılında da, Yorke ve May meslektaşlarının ilgisini çekmek için çırpınırken, Sinai ve diğer bazı arkadaşları fizikçileri süratle toplayıp merkezi Gorki'de olan güçlü bir çalışma grubu kurdular. Son yıllarda, Batılı bazı kaos uzmanları[24] gelişmeleri yakından takip edebilmek için Sovyetler Birliğine muntazaman seyahat etmeyi adeta vazife haline getirdiler; ancak birçoğu da, kaos biliminde Batının yaklaşımlarıyla yetinmek zorunda kaldı.

Batıda, Yorke ve May periyodu iki katına çıkarma olayının şokunu tümüyle yaşayan ve bu şoku bilim çevrelerine aktaran ilk bilim adamlarıdır. Bu fenomenin farkına varan birkaç matematikçi buna teknik bir sorun gözüyle bakıyor ve bu olguyu sayısal bir garabet, hatta neredeyse bir cins eğlence olarak görüyordu. Önemsiz saydıklarından değil. Onun, sadece kendi özel evrenlerine ait bir şey olduğunu düşünüyorlardı.

Biyologlar kaos yolunda önlerine çıkan dallanmaları ihmal etmişlerdir; bunun nedeni matematik alanında sofistike olmayışları ve düzensizliğin davranış biçimini araştırmak için gerekli olan motivasyondan yoksun oluşlarıydı. Matematikçiler dallanmaları görmelerine rağmen durmayıp çalışmalarına devam ettiler. İki bilim dalının da tarağında bezi bulunan May ise akıllara durgunluk veren ve çok derinliği olan bir alana girmekte olduğunu anladı.

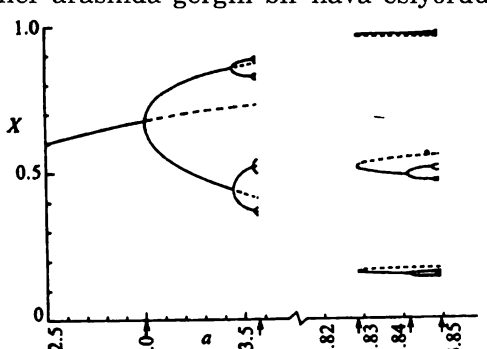
Sistemlerin en basiti olan bu sistemi daha ince ayrıntılarıyla incelemek[25] isteyen bilim adamları çok daha güçlü bilgisayarlara ihtiyaç duyuyorlardı. New York Üniversitesinde, Courant Institute of Mathematical Sciences'da (Courant Matematik Bilimleri Enstitüsü) görevli olan Frank Hoppenstead'in gücü o kadar yüksek olan bir bilgisayarı vardı ki, elde ettiği sonuçları bir film haline getirmeye karar verdi.

Hoppenstead matematikçi olmasına rağmen daha sonraları biyoloji problemlerine aşırı ilgi duymaya başlamıştı; lojistik nonlineer denklemi Control Data 6600 tipi bilgisayarında yüz milyonlarca kere çalıştırdı. Bilgisayarın ekranında görünen bin değişik parametre değerinin her birinden,

bin değişik ayarından resimler çekti. Dallanmalar göründü, ardından kaos geldi - sonra da kaos içinde, düzenin küçük dikenleri, kısa ömürlü istikrarsız halleriyle bunları takip etti. Periyodik davranış biçiminin hızla uçuşmaları. Hoppenstead kendi filmini seyrederken, tanımadığı yabancı bir âlemi kuşbakışı seyrediyormuş hissine kapıldı. Bir an, sanki kaos hiç yokmuş gibi göründü. Hemen sonra ise öngörülemez bir karmakarışıklıkla doluverdi. Hoppenstead uğradığı şaşkınlıktan ömür boyu kurtulamadı.[26]

May, Hoppenstead'in filmini seyretti. O da, genetik, iktisat ve akışkanlar dinamiği gibi başka bazı bilim dallarından benzerlerini toplamaya başladı. Kaosun avukatlığını yapan kişi olarak sırfi matematikçilerden iki alanda üstündü. Birincisi, May'e göre, basit denklemler gerçeği mükemmel bir şekilde temsil *edemezdi*. Bunlar aslının modelinden başka bir şey olmadığı için, ne kadar yaygın bir uygulama alanı bulabileceklerini merak etmeye başladı. İkincisi ise seçerek girdiği bu bilim dalında, kaosun sırlarının açığa vurulmasının heyecanlı bir tartışmaya doğrudan malzeme teşkil edeceğini bilmesiydi.

Kaldı ki, popülasyonlar biyolojisi uzun zamandan beri tartışmaların cazibe merkezi haline gelmişti. Üniversitelerin biyoloji bölümlerinde, mesela moleküler biyologlarla çevre bilimciler arasında gergin bir hava esiyordu. Moleküler



Çatallaşma diyagramının daha güçlü bilgisayarlarla yapısının zenginliği keşfedilmeden önceki hali, May tarafından ilk görüldüğü şekliyle resimde gösterilmiştir.

biyologlar kendilerinin *gerçek* bilimle uğraştığı, çetrefil, çetin ceviz problemlere el attığı, buna karşılık çevre bilimcilerin belli belirsiz çalışmalar yaptığı kanısındaydılar. Çevre bilimciler ise moleküler biyolojinin teknik alanda yarattığı şaheserleri, iyi tanımlanmış sorunların zekice geliştirilmesinden ibaret olarak görmekteydiler.

May'in ifade ettiğine göre, 1970'li yıllarda çevre biliminin kendi içinde de,[27] nüfus değişmesinin doğası konusuyla ilgili olarak meselenin esasına ilişkin bir tartışma cereyan etti. Çevre bilimcilerin kendi aralarındaki bölünmelerin altında hemen hemen kişisel nedenler yatıyordu. Bazıları dünyaya bakıp düzen görüyordu: Popülasyonlar, bazı istisnalarla, birtakım yasalara tâbiydi ve düzen içinde bulunuyordu. Diğer bir kısmı ise tam tersini düşünmekteydi: Popülasyonlar, bazı istisnalarla, gelişigüzel bir şekilde dalgalanıyordu. Bu iki zıt görüş taraftarlarının, sırfi matematiği karmakarışık biyoloji sorunlarına uygulama konusunda da birbirlerine ters düşmeleri tesadüf değildi. Popülasyonların düzenli olduğu görüşünde olanlar, bunların birtakım determinist mekanizmalara tabi olmak zorunda olduğunu öne sürüyorlardı. Popülasyonların gelişigüzel olduğu görüşünde olanlar ise bunların öngörülemez çevre faktörlerinin etkisi altında kaldıklarını, bu faktörlerin de etrafta determinist sinyal adına ne varsa yok ettiğini öne sürmekteydiler. Ya determinist matematikten düzenli davranış biçimi çıkıyordu ya da gelişigüzel dış gürültü gelişigüzel davranış biçimi yaratıyordu. Bunlardan başka alternatif yoktu.

Bu münakaşa bağlamında, kaos da insanı hayretler içinde bırakacak bir mesaj getiriyordu: basit determinist modellerden gelişigüzel gibi görünen davranış biçimleri çıkması mümkündü. Bu davranış biçiminin gerçekten de çok ince ve narin bir yapısı mevcut olmasına rağmen, hiçbir parçasını gürültüden ayırt etmek mümkün değildi. Bu buluş tartışmanın can noktasını teşkil ediyordu.

May, basit kaotik modeller prizmasından baktığı biyolojik sistemlerin sayısı arttıkça, uygulamacıların normal sezgilerine ters düşen sonuçlarla karşılaşmaya devam etti. Mesela

epidemiyolojide, salgın hastalıkların düzenli ya da düzensiz olarak, dönem dönem geldiği gayet iyi bilinir. Kızamık, çocuk felci, kızamıkçık gibi hastalıkların hepsinin periyodik olarak çoğaldığı ve azaldığı dönemler vardır. May bu salınımların nonlineer bir model içinde tekrarlanabileceğinin farkına varmış ve böyle bir sistem ani bir sarsıntı geçirdiği takdirde - pertürbasyona neden olan bir programda olarak mesela bir aşılama kampanyası açılsa - neler olacağını merak etmekten de geri kalmamıştı. Safdil sezgilere inanılırsa, sistem arzu edilen yönde düzenli bir şekilde değişikliğe uğrayacaktı. Ancak, May, gerçekte muazzam büyüklükte salınımlar oluşması ihtimalinin var olduğunu buldu. Uzun süreli trendin sert bir düşüş göstermesi halinde bile, yeni kurulacak bir dengeye doğru uzanan yolda ani ve şaşırtıcı yükselişler yüzünden kesintiler meydana gelecekti. Hakikaten, gerçek hayatta uygulanan programlardan sağlanan verilerde, mesela İngiltere'de kızamıkçığın kökünü kazımak için yürütülen bir kampanyada, doktorlar tıpkı May'in öngördüğü salınımlara benzeyen salınımların oluştuğunu gördüler. Oysa sağlık yetkilileri, kızamıkçık ya da bel soğukluğunda kısa süreli ani bir artış görüldüğü anda, aşı programının başarısızlığa uğradığı kanısına varıyorlardı.

Kaos üzerinde yapılan araştırmalar birkaç yıl içinde teorik biyolojiyi büyük ölçüde kamçılayarak biyologlarla fizikçilerin, bilimsel düzeyde ortaklıklara girişmesini sağlamıştır ki, birkaç yıl önce birisi kalkıp böyle bir şeyin olacağını söylese kimse inanmazdı. Çevre bilimciler ve epidemiyologlar kendilerinden daha önceki bilim adamlarının bulup da işlenmesi mümkün değil diye bir kenara bıraktıkları eski verileri yeniden ortaya çıkardılar. Determinist kaosa hem New York şehrinin sağlık kayıtlarına geçen kızamık salgınında[28] hem de (Hudson's Bay Şirketiyle çalışan avcıların tuttuğu kayıtlardan anlaşıldığına göre) Kanada'da yaşayan vaşak popülasyonunun iki yüz yıllık dalgalanmalarında rastlanmıştır. Moleküler biyologlar proteinlere hareket halindeki sistemler gözüyle bakmaya başlamışlardır. Fizyologlar organlara statik yapılar olarak bakmak yerine bunları, bazıları düzenli

bazıları da düzensiz olan salınımlı kümeler olarak görmüşlerdir.

Bütün bilim dallarında çalışan uzmanların, sistemlerin karmaşık davranış biçiminden haberdar olduğunu ve bunun tartışmasını yaptığını May de biliyordu. Her bilim dalı kendi alanında vücut bulan kaosu sadece kendisine özgü bir olay saymıştır. Bu düşünce karamsarlığa yol açmıştır. Peki ya, basit modeller de açıkça, gelişigüzel bir davranış biçimi sergileseler ne olurdu? Ya da birbirinden çok farklı alanlardaki karmaşıklık için *aynı* basit modeller kullanılsa? May araştırmaya henüz başlamak üzere olduğu bu şaşırtıcı yapıların temelinde biyoloji ile herhangi bir bağlantıları bulunmadığını fark etti. Kendisinden başka bilim adamları arasında bu duruma kendisi kadar şaşıracak kaç kişi bulunabileceğinin merakı içindeydi. Üzerinde çalışmaya başladığı ve sonunda, kendisine "vahiy gelmişcesine" bir ilhamın eseri olarak yazdığına inandığı sentez niteliğindeki makalesi 1976'da *Nature* dergisinde yayınlandı.

May, "Her genç öğrenciye bir küçük hesap makinesi verilse ve lojistik diferansiyel denklemiyle oynamaya teşvik edilse bugün dünyanın çehresi farklı olur,"[29] diyordu. *Nature*'de çıkan makalesinde en ince ayrıntılarına kadar açıkladığı bu basit hesap işlemi, normal düzeyde bir bilim eğitiminden geçen insanların, dünyada var olan ihtimallere ilişkin çarpık algılamalarını doğrultmalarına yarayacaktı. İnsanların, ekonomik hayattaki devrelerden dedikoduların yayılmasına kadar her konudaki düşünce tarzını değiştirecekti.

May'in savunduğu teze göre, kaos öğretilmesi gereken bir şeydi. Bilim adamı olmak için geçilen normal eğitim sürecinin insanı yanlış hükümlere sevkettiği artık kabul edilmeliydi. May'e göre, lineer matematik, Fourier dönüşümleri, ortogonal fonksiyonlar, regresiyon teknikleri gibi gelişmeler sayesinde ne kadar mükemmel bir düzeye erişmiş olsa da bilim adamlarının büyük ölçüde nonlineer olan dünyaları hakkında yanılmalarına sebebiyet veriyor; bundan kaçınılması da mümkün olamıyordu. Makalesinde, "Bu şekilde ge-

lişen matematik sezgisi, öğrencinin, en basit nonlineer sistemlerden birinin gösterdiği garip davranış biçimine ilişkin problemlerle uğraşmak için ihtiyaç duyduğu araç ve gereçleri de sağlayamamaktadır"[30] diye yazmıştır.

"Yalnız araştırma alanında değil, politika ve ekonomi âlemlerinin de günlük yaşantısında karşılaştığımız basit nonlineer sistemlerde mutlaka basit dinamik özellikler bulunması gerekmediğini bilen insanların sayısı artabilseydi bugünkünden daha mutlu bir yaşantımız olurdu."

Doğanın Bir Geometrisi

Oysa ilişki ortaya çıkmaktadır,
Kum üstünde bir bulutun, yamaçta bir şeklin
Gölgesi gibi yayılan bir küçük ilişki.

WALLACE STEVENS,
"Kaos Bilirkişisi"

Gerçeğin resmi[1] Benoit Mandelbrot'un zihninde, yıllar geçtikçe daha belirgin hale geliyordu. 1960'ta zihninin bir köşesinde belli belirsiz, uçuk, şekillenmemiş bir hayal gibi durmaktaydı. Mandelbrot hayalindeki o müphem şekli görür görmez tanıdı, resim Hendrik Houthakker'in bürosundaki kara tahtanın üzerinde duruyordu.

Matematiğin her tarağında bezi olan Mandelbrot International Business Machines Corporation'in (IBM) temel araştırma birimine kapağı atmıştı. O aralar kendini iktisata kaptırmış, ekonomilerde yüksek ve düşük düzeylerdeki gelir dağılımını inceliyordu. Harvard'da iktisat profesörü olan Houthakker, Mandelbrot'u bir konferansa vermeye davet etmişti; genç matematikçi Harvard Yard'ın tam kuzeyinde bulunan muhteşem ekonomi bölümü binasındaki Littauer Merkezine geldiğinde, kendi yaptığı buluşları yaşlı profesörün kara tahtasında asılı[2] görünce hayretler içinde kaldı. Mandelbrot işi şakaya döktü - nasıl olur da benim grafik daha ben konferansımı vermeden önce buraya gelmiş olabilir ki? - Houthakker Mandelbrot'un neden bahsettiğini anlamamıştı bile. Grafiğin gelir dağılımıyla hiç ilgisi yoktu; son sekiz yılın pamuk fiyatlarını gösteriyordu.

Aslında Houthakker de bu grafikte bir şeylerin garip olduğunun farkındaydı. Ekonomistler genellikle pamuk gibi malların fiyatlarında, biri düzenli diğeri de gelişigüzel olmak üzere iki farklı ritime uyarak dalgalanmalar olduğu varsayımını geçerli saymışlardır. Uzun vâdede, ekonominin gerçek kuvvetleri - New England tekstil sanayiinin yükseliş ve düşüşü veya uluslararası ticaret yollarının açılışı gibi - fiyatları düzenli bir mecraya sokmaktadır. Kısa vâdede, fiyatlar düşük veya yüksek düzeyde bir gelişigüzellikle sıçramalar göstermektedir. Halbuki, Houthakker'in elindeki veriler gerçekleşmesini beklediği sonuca hiç mi hiç uymuyordu. Çok yüksek sıçramalar gösteriyordu. Fiyat değişikliklerinin birçoğu, tabii ki, düşük düzeyde kalıyordu, fakat küçük değişmelerin büyük değişmelere oranı, Houthakker'e göre olması gerektiği kadar yüksek değildi. Dağılım yeteri kadar hızla inmiyordu. Biraz fazla dal budak sarmış, peşinde uzun bir kuyruk bırakmıştı.

Bu değişmeyi bir grafik üzerinde göstermek isterseniz geçmişte olduğu gibi, şimdi de ortaya çıkacak standart model çan şeklinde bir eğridir. Çanın yüksek olduğu orta kısımda ortalama değerlerin civarındaki veriler toplanmıştır. Kenarlarda, düşük ve yüksek değerlerin sayısı hızla düşmektedir. Dahiliyecilerin ellerine ilk aldıkları alet nasıl stetoskop ise istatistikçilerin de ilk başvurdukları gösterge çan eğridir. Çan eğrisi istatistikte genel normu ya da daha basit bir ifadeyle, normal dağılımı gösterir - buna Gauss dağılımı da denir. Gelişigüzelliğin doğasını ortaya koyan bir ifade biçimidir. Meselenin aslı şudur: değerler değiştiği zaman, değişen şeyler ortalama bir noktanın yakınında kalmaya çalışır; ortalamanın etrafında dağıldıkları zaman da bu dağılım oldukça düzenli ve yumuşak bir biçimde gerçekleşir. Ancak, ekonomideki düzensizlik içinde çıkar bir yol bulmak için bir araç arandığında, bu klasik kavramlar yeterli olamamaktadır. Nobel ödülü sahibi Wassily Leontief'in söylediği gibi, "Ampirik araştırmanın hiçbir alanında hem bu kadar yoğun ve sofistike bir istatistik mekanizması kullanılıp hem de bu kadar ilgisiz sonuçlar alındığı görülmemiştir."[3]

Houthakker pamuk fiyatlarındaki değişmeleri grafikte gösterirken ne yaparsa yapsın bir türlü çan eğrisi modeline oturtamıyordu. Fakat ortaya öyle bir resim çıkmıştı ki, Mandelbrot bunu aklının köşesinden bile geçmeyen değişik yerlerde görmeye başlamıştı. Birçok matematikçinin tersine, Mandelbrot problemleri ele alırken paternler ve şekiller konusundaki sezgileriyle hareket etmiştir. Analizi güvenilir bulmamış, kendi zihnindeki resimlere güvenmiştir. Gelişigüzel, stokastik fenomenlerin daha başka yasalara tabi olduğu, bu yasaların daha farklı davranış biçimine sahip oldukları düşüncesi Manndelbrot'ta daha önce de vardı. IBM'in New York'ta, kuzey Westchester İlçesinin dağlık kesimlerindeki Yorktowh Heights'da bulunan dev araştırma merkezine geri dönerken, Houthakker'in pamuk verilerini de bir bilgisayar kartı kutusuna koyarak yanında götürdü. Sonra da Washington'daki Tarım Bakanlığından daha fazla veri sağlayıp 1900'lü yılların başlarına kadar geri gitti.

NORMAL
HATA YASASI
DOĞAL FELSEFEDE
BEŞERİYETİN TANIDIĞI
EN BÜYÜK GENELLEMELERDEN
BİRİNİ TEŞKİL EDER • HEM TABİİ VE
SOSYAL BİLİMLERDE HEM DE TIP, TARIM
VE MÜHENDİSLİK ALANLARINDA YAPILAN
DENEY VE ARAŞTIRMALARIN REHBERİDİR • GÖZLEM
VE DENEY SONUCUNDA ELDE EDİLEN TEMEL VERİLERİN ANALİZİ
VE YORUMLANMASI BAKIMINDAN VAZGEÇİLEMEYECEK KADAR ÖNEMLİ BİR ARAÇTIR.

ÇAN EĞRİSİ.

Diğer bilim dallarında çalışanlar gibi, ekonomistler de bilgisayarın nimetlerinden yararlanmak bakımından çağ atla-

yıp, eskiden hayal bile edemeyecekleri ölçeklerde bilgi toplama, düzenleme ve işleme imkânlarına kavuştuklarının bilincine yavaş yavaş varmaya başladılar. Ancak, istenen her bilgi elde edilemiyordu; üstelik derlenip toparlanan bilgilerin de işe yarar bir biçime sokulması gerekmekteydi. Delikli kart dönemi daha yeni yeni başlıyordu. Tabii bilimlerde çalışan araştırıcılar için binlerce, hatta milyonlarca veriyi toplamak çok daha kolaydı. Ekonomistler ise, tıpkı biyologlar gibi, irade sahibi canlıların yaşadığı bir dünya ile uğraşmaktaydılar. Hele ekonomistlerin inceleme konusu, bütün canlılar arasında ne yapacağı en belli olmayan yaratıkların kararlarıydı.

Ne var ki, ekonomistlerin çevresinde gene de sabit bir miktarda sayılar üretiliyordu. Mandelbrot'a göre, pamuk fiyatları harika bir veri kaynağı oluşturmaktaydı. Kayıtlar tamamdı, bir yüzyıllık süreyi hatta daha da fazlasını görebileceğiniz kadar da eskiydi. Alım satım evreni içinde pamuk öyle bir parçayı teşkil ediyordu ki, bir kere merkezi bir pazarı vardı - bu yüzden de merkezi bir kayıt mekanizması vardı - çünkü yüzyılın başlarında ABD'nin güneyindeki bütün pamuk New York emtia borsası üzerinden New England'a doğru yol alıyor, Liverpool'daki pamuk fiyatları bile New York'taki fiyatlara bağlı kalıyordu.

Emtia fiyatlarını ya da hisse senedi fiyatlarını analiz etmek bahis konusu olduğunda ekonomistlerin elinden çok fazla bir şey gelmiyordu, ama fiyat değişme mekanizmasının nasıl işlediği hakkında iyi kötü bazı temel görüşlere de sahiptiler. Üstelik bazı benzer kanaatlerinden ötürü oluşan birtakım ortak yaklaşımları da vardı. Bunlardan biri, küçük, geçici nitelikteki değişiklikler ile büyük, uzun süreli değişiklikler arasında ortak hiçbir şey bulunmadığı idi. Hızlı dalgalanmalar gelişigüzel bir biçimde oluşuyordu. Bir günlük işlemlerde karşılaşılan küçük ölçekli iniş ve çıkışlar hiçbir özelliği bulunmayan, öngörülmesi mümkün olmayan gürültülerden ibaretti. Buna karşılık, uzun süreli değişiklikler tamamen ayrı bir türü teşkil ediyordu. Fiyatların aylar, yıllar ya da on yıllık dönemler içinde gösterdiği geniş kapsamlı dalgalanmaları belirleyen güçler, makroekonomik kuvvetler,

savaş ya da resesiyon trendleri gibi, teorik olarak her şeyi izah edebilen güçlerdi. Bir tarafta, kısa süreli dalgalanmanın vızıltısı, diğer tarafta ise uzun süreli değişikliğin sinyali.

Bu ikiliğin Mandelbrot tarafından geliştirilen hakikat resminde hiçbir yeri yoktu. Küçük değişiklikleri büyüklerinden ayırt etmek yerine Mandelbrot'un resminde hepsi birbirine bağlanmıştı. Mandelbrot şekillerin şu ya da bu ölçekte olmasına bakmıyor, her ölçekteki şekilleri araştırıyordu. Zihnindeki resmi nasıl çizeceği hakkındaki düşünceleri daha henüz netleşmiş değildi, fakat bir nevi simetri olması gerektiğini hissediyordu; bu sağ ve sol ya da üst ve alt arasındaki bir simetri değil, büyük ve küçük ölçekler arasındaki bir simetri olacaktı.

Gerçekten de, Mandelbrot pamuk fiyatlarına ilişkin verileri IBM'in bilgisayarlarında enine boyuna inceleyince, eskiden beri peşinde olduğu hayret verici sonuçları nihayet buldu. Normal dağılım bakımından sapmalar meydana getiren sayılar, boyutsuzluk açısından simetri meydana getiriyordu. Tek tek ele alındığında her fiyat değişikliği, gelişigüzel ve öngörülemez bir nitelik taşıyordu. Bununla birlikte, değişiklik dizileri ölçeğe tabi değildi: günlük fiyat değişmelerini ve aylık fiyat değişmelerini gösteren eğriler birbirine tamamen uyum gösteriyordu. Mandelbrot'un yaptığı şekilde analiz edildiği zaman ortaya çıkan havsala almayacak bir şey, altmış yıllık allak bullak bir dönem boyunca, üstelik iki dünya savaşı ve bir de ekonomik buhran görülmüş olmasına rağmen, varyasyon derecesinin sabit kalmış olmasıydı.

En düzensiz veri kümeleri içinde bile hiç umulmadık türde bir düzen vardır. İncelediği sayıların ne kadar gelişigüzellik içinde olduğuna bakan Mandelbrot, kendi kendine şu soruyu yöneltmiştir: "Bunlar neden bir yasaya uymak zorunda olsun? Ayrıca, neden hem fertlerin gelirlerine hem de pamuk fiyatlarına uygulanması gerekiyordu ki?

Aslında, Mandelbrot'un iktisat alanındaki bilgilerinin yetersizliği ile iktisatçılarla iletişim kurabilme konusundaki yeteneksizliği arasında fazla bir fark yoktu. Buluşları hakkında yayınladığı makalelerin baş tarafında, öğrencilerin-

den birinin yazdığı açıklayıcı mahiyette bir makale yer alır, bu makalede Mandelbrot'un yazdıkları ekonomistlerin anlayacağı bir dille ifade edilirdi. Mandelbrot ilgi alanını değiştirmişti. Buna rağmen, boyutsuzluk fenomenini araştırma hevesini her zaman gönlünde taşıdı. Bu özelliği onun hayatının ayrılmaz bir parçası oldu - adeta imza gibi bir şeydi.

Yıllar sonra, bir konferansından önce takdim edildiği[4] sırada (". . . Harvard'da iktisat, Yale'de mühendislik, Einstein Tıp Fakültesinde fizyoloji dersleri vermiştir . . .") denildiğinde gururla şu sözleri söylemişti: "Daha önce yaptığım işlerin listesini dinlerken ben gerçekten yaşıyor muyum diye merak ettiğim çok olmuştur. Bu bütünlerin kesiştiği noktalarda mutlaka boşluk vardır." Gerçekten de, IBM'de çalışmaya başladığı ilk günlerden itibaren, Mandelbrot'un adı, çok çeşitli dallardan oluşan o uzun listede değildir artık. Kendisine hep, matematiğe o gün modası olmayan konularda genel yaklaşımlardan farklı bir bakış açısı getiren, hüsnükabul görmediği bilim dallarında araştırmalar yapmaya kalkışan, sırf makalelerini yayınlatabilme gayreti içinde olduğu için en iddialı fikirlerini gizleyen, Yorktown Heights'daki patronlarının kendisine güven duymaları dolayısıyla geçimini sağlayabilen bir yabancı gözüyle bakılmıştır. Başta iktisat olmak üzere bazı alanlara zaman zaman el uzatmış, fakat sonra geriye adım atarken arkasında gayet cazip ve çarpıcı fikirler bıraktığı, ancak sağlam temellere oturan çalışmalar gerçekleştiremediği görülmüştür.

Kaosun tarihinde Mandelbrot kendi bildiği yoldan gitmiştir. Oysa 1960'ta kafasında şekillenen gerçek resmi karmakarışık bir düşünceden bütün unsurları eksiksiz olarak içinde bulunan bir geometriye dönüşmüştü. Kendisiyle geçinilmesi zor olan bu matematikçi, Lorenz, Smale, Yorke ve May gibi bilim adamlarının çalışmalarına katkılarda bulunan fizikçilere kıyasla öyle pek ortalarda görünmemişse de hem kullandığı teknikler hem de dili itibariyle, bu fizikçilerin yeni bilimlerinin ayrılmaz bir cüzü haline gelmiştir.

Mandelbrot'u son yıllarda geniş alnı ve aldığı bilimsel ödüllerin uzun listesiyle tanımış olanlara bu tanım belki ga-

rip gelecektir, ama Benoit Mandelbrot'u iyi anlamak için onu bir mülteci olarak düşünmek gerekir. 1924'te Varşova'da, Litvanyalı bir Yahudi ailesinin çocuğu olarak dünyaya gelmişti;[5] babası hazır giyim toptancılığı yapan bir tüccardı, annesi dişçiydi. Jeopolitik gerçeğin bilincine varan aile 1936'da, biraz da Mandelbrot'un matematikçi olarak Paris'te yaşayan amcası Szolem Mandelbrojt'tan ilham alıp Paris'e göç etmişti. Savaş çıkınca aile bir kez daha Nazilerden önce davrandı ve Mandelbrojt'lar bütün mallarını terkedip sadece ellerine aldıkları birkaç valizle Paris'ten güneye doğru yollara dökülen mülteci kervanına katıldılar. Sonunda Tulle şehrine vasıl oldular.

Benoit bir süre hassas aletler yapan bir atölyede çırak olarak çalıştı, bu süre içinde uzun boyu ve kültürü ile dikkatleri üstüne çekmesi tehlikeli bir hal almaya başladı. O günler kolay kolay unutulamayacak kâbuslar ve korkularla doluydu; fakat, onun büyük sıkıntılar çektiğine dair o zamanlardan kalmış hatırası pek yok gibidir; tam tersine Tulle'de veya başka yerlerde öğretmenlerinden gördüğü dostluğu hatırlar; kaldı ki bu öğretmenlerin de bazıları, savaş dolayısıyla bir kenara itilmiş bulunan saygın bilim adamlarıydı. Aslında Benoit'nın okul hayatı da düzensiz ve kesintili olmuştu. Kendisi hiç alfabe öğrenmediğini hatta bundan daha da önemlisi beşten yukarıya çarpım cetvelini öğrenmediğini söylerdi. Fakat gene de Tanrı vergisi bir yeteneği vardı.

Paris kurtulduktan sonra, herhangi bir hazırlığı olmamasına rağmen, École Normale ve École Polytechnique'in bir ay süren sözlü ve yazılı giriş sınavlarına girdi. Sınavda bir sürü soru arasında, eskiden kalma bir usul olarak, resim çiziminden de imtihan olunuyordu; Mandelbrot kendisinde, Milo Venüs'ünü çok kolay kopya edebilme gibi bir yeteneğin bulunduğunu keşfetti. Sınavın matematikle ilgili bölümlerinde - cebir ve analiz sorularında - eğitim yetersizliğini geometrideki sezgilerini kullanarak kapatmaya çalıştı. Önüne bir analitik problem konduğunda, çözümü her zaman zihnindeki bir şekilden yola çıkarak düşünebileceğini fark etmişti. Problem olarak bir şekil verildiğinde, onu değiştirmenin, simetrilerin-

de değişiklik yapmanın, şekli daha ahenkli hale getirmenin bir yolunu buluyordu. Şekilleri değiştirdikten sonra, çoğu zaman, sorulan problemin bir çözümünü doğrudan doğruya bulması mümkün oluyordu. Fizikte ve kimyada geometri sezgisini uygulayamadığı için düşük notlar aldı. Buna karşılık, matematikte, doğru çözüm yollarını kullanarak cevap vermesi mümkün olmayan soruların hepsi de, kafasında evirip çevirdiği şekiller karşısında karşı koyamayıp çözüldü.

École Normale ve École Polytechnique Amerikan eğitim sisteminde eşi olmayan, seçkinlerin devam ettiği okullardı. Bu iki okul birlikte, her sınıfta en fazla 300'ü bulan öğrenciyi, Fransız üniversitelerinde öğretim üyesi olmaya ve kamu hizmetinde yüksek düzeylerde çalışmaya hazırlıyordu. Mandelbrot diğerinden daha küçük ve prestiji daha yüksek olan "Normale"de başladı, ancak birkaç gün sonra "Polytechnique"e transfer etti. Daha şimdiden Bourbaki[6] mültecisi olmuştu bile.

Fransızların, otoriter bilim müesseselerine sevgi duymaları ve eğitimde usta-çırak ilişkilerine değer veren bir karakter yapısına sahip olmaları dolayısıyla, Bourbaki'nin Fransa'dan başka bir ülkede doğması mümkün olamazdı. Birinci Dünya Savaşının sona erip daha barış düzeninin henüz kurulmadığı bir dönemde Szolem Mandelbrot ve Fransa'nın matematikteki pozisyonunu yeniden canlandırmak amacında olan bir grup genç ve kaygısız matematikçi tarafından kurulan bir kulüp olarak başladı. Savaşın nüfus üzerindeki olumsuz etkileri yüzünden üniversite profesörleri ile öğrenciler arasında bir yaş uçurumu doğmuş, bu yüzden akademik devamlılık geleneği bozulmuş ve bu gençler matematik uygulamaları için yeni birtakım temeller kurmaya soyunmuşlardı. Grubun adı bile bir nevi şakayla karışık olarak, kulağa garip ve çekici gelmesi dolayısıyla - sonradan tahmin edildiğine göre - on dokuzuncu yüzyılda yaşamış Yunan asıllı bir Fransız generalinin adından alınmıştı. Bourbaki'nin doğuşunun temelinde yatan mizah ve eğlence havası kısa bir süre sonra yok oldu.

Bourbaki'nin üyeleri gizli gizli toplanırlardı. Gerçekten de hepsinin adı bilinmemektedir. Sayıları değişmiyordu. Tespit

ettikleri kurala göre bir üye 50 yaşına geldiğinde ayrılınca, kalanlar onun yerine başka bir üyeyi seçiyorlardı. Bunlar matematikçilerin en iyileri ve en başarılı olanlarıydı; etki alanları da kısa bir süre sonra bütün Avrupa kıtasına yayıldı.

Bourbaki, kısmen de, on dokuzuncu yüzyılın sonlarında yaşayan Poincaré'ye tepki olarak başlamıştı; büyük bir adam olan Poincaré, eşi nadir görülen üretken bir düşünür ve yazardı, ancak bilimsel disipline çok da önem verdiği söylenemezdi. Poincaré, "Ben bunun doğru olması gerektiğini biliyorum, o halde ne diye ispat edeyim ki?" diyip işin içinden çıkardı. Bourbaki Poincaré'nin matematiğin temellerini sarstığı düşüncesindeydi; bu yüzden grup, matematiği tekrar disiplinli hale getirmek iddiasıyla, stil olarak gittikçe daha dogmatikleşen muazzam bir incelemeyi kaleme almaya başladı. Eserin merkez teması lojik analizdi. Matematikçiler işe, temeli sağlam başlangıç prensipleriyle başlamalı ve geri kalan her şeyi bu ilkelerden türetmeliydi. Bourbaki grubu matematiğin bütün bilimler arasındaki öncelikli yerini vurguluyor ve diğer bilimlere bağımlı olmadığı konusu üzerinde de ısrarla duruyordu. Matematik matematikti - matematiğin gerçek fiziksel fenomenlere uygulanması bakımından değerlendirilmesi doğru değildi. Her şeyden öteye, Bourbaki resim kullanımını da kabul etmiyordu. Görsel organlar matematikçilerin şaşırmasına her zaman sebep olabilirdi. Geometri de güvenilir bulunmuyordu. Matematik katışıksız, formel ve mutlak olmalıydı.

Doğrusu bu gelişme sadece Fransa'ya mahsus değildi. Amerika Birleşik Devletleri'ndeki sanatçılar ve yazarlar nasıl sırf halkın zevkine hitap eden eserler vermekten kaçınıyorsa, matematikçiler de fiziksel bilimlerin ihtiyaçlarına cevap verecek çalışmaları yapmaktan kaçınma gayretindeydi. Sonuçta, bu çalışmalara dışarıya karşı kapalı bir duyarlılık hâkim olmuştur. Matematikçilerin ele aldığı konular kendi kendine yeterli hale gelmiş; kullandıkları yöntem de şeklen tam aksiyom halini almıştır. Matematikçiler yaptıkları çalışmaların ne gerçek dünyada ne de bilimdeki hiçbir olayı açıklamadığını söyleyip bundan sadece gurur duymuşlardır. Bu

yaklaşımın çok yararlı sonuçları olmuş ve matematikçiler de bundan azami yararı sağlamaktan geri kalmamışlardır. Steve Smale, matematikle tabii bilimleri bir araya getirmeye çalıştığı zamanlarda *bile matematiğin başlı başına bir disiplin olması gerektiğine*[7] başka hiçbir şeye inanmadığı kadar inanmıştı. Matematiğin kendi kendine yeterli olması, beraberinde berraklık ve netliği getirmiştir. Berraklık ve netlik ise aksiyomlu yöntemin bünyesindeki mutlaklık ile bir arada bulunmaktadır. Ciddi matematikçilerin anlayışına göre, mutlaklık, bu bilim dalının güç kaynağı ve temel belirleyicisidir; matematiği ayakta tutan öyle bir çelik iskelettir ki, o olmasa hiçbir şeyin ayakta kalması mümkün olamaz. Mutlaklık sayesinde matematikçiler yüzyılların derinliklerinden bugüne kadar gelen bir düşünce zincirini tekrar ele alıp güvenceli bir şekilde devam ettirmek imkânını bulabilmişlerdir.

Ancak, mutlaklığın gerekli görülmesinin yirminci yüzyılda matematik üzerinde bazı olumsuz etkileri olmuştur. Matematik kendine özgü bir evrimle gelişmektedir.[8] Araştırıcı bir problemi alır ve çözümü için hangi yoldan devam edeceği konusunda bir karar verir. Çoğu zaman, bu kararın, matematiksel açıdan mümkün olan yol ile tabiatı anlamak açısından ilginç olan yol arasında yapılan belirli bir tercih sonucunda alındığı görülür. Matematikçi bakımından tercih apaçıktır: belirli bir süre, tabiatla açıkça ilişkili olan her şeyi terkedecektir. Sonunda öğrencileri de tıpkı buna benzer bir tercihle karşı karşıya kalacak ve onlar da tıpkı buna benzer bir karar vereceklerdir.

Bu değerlerin, Fransa'da olduğu kadar katı biçimde kurallara bağlandığı başka bir yer olmadığından, Bourbaki kulübü, kendi kurucularının bile tahayyül edemeyeceği kadar başarılı oldu. Koyduğu ilkeler, benimsediği üslup ve kullandığı işaretler sistemi, uyulması mecburi kurallar haline geldi. En iyi öğrencileri kontrolu altında tutması ve matematikte istikrarlı bir başarı grafiği çizmesi dolayısıyla tartışılmaz bir meşruluk elde etti. École Normale'de tamamen Bourbaki hâkimdi; Mandelbrot'un ise buna tahammül etmesi mümkün değildi. Bourbaki yüzünden Normale'den kaçtı, on

yıl sonra da, gene aynı sebepten dolayı Fransa'dan kaçarak Amerika Birleşik Devletleri'ne yerleşti. Otuz, kırk yıl kadar sonra da Bourbaki bilgisayarın göze hitap eden yeni bir matematiği ayakta tutabilme gücü dolayısıyla, sebep olduğu bir şok neticesinde can çekişmeye başladı. Ancak, ne Bourbaki'nin şekilciliğiyle yaşayabilen ne de geometrideki sezgilerini terketmeye razı olan Mandelbrot bakımından bunda bile çok geç kalınmıştı.

Kendi efsanesini bizzat yaratması gerektiğine her zaman inanmış bir insan olarak Mandelbrot "*Kim Kimdir*" kitabında kendisiyle ilgili bölüme şu cümleleri eklemişti: "Bilimin, (tıpkı spor gibi) rekabeti her şeyin üstünde gören bir havaya sokulması; bu rekabetin şartlarına açıklık kazandırmak için de, tümüyle, dar bir kapsamda tanımlanan uzmanlık alanlarına çekilmesi halinde, bilimden hayır beklememek gerekir. Kendi tercihi gereği göçebe olan pek az sayıdaki bilgin, yerleşik bilim dallarının fikir düzeyindeki mutluluğu bakımından önemlidir. Kendisi de "tercihi gereği göçebe" olan ya da kendi kendini "mecburiyetten dolayı öncü"[9] olarak tanımlayan Mandelbrot, Fransa'dan çekildiğinde akademik çevreden de çekilmiş ve IBM'in Thomas J. Watson Araştırma Merkezinde sığınmacı olmayı kabul etmişti. Kimsenin tanımadığı bir araştırıcı iken otuz yıllık bir yolun sonunda şöhrete kavuşmasına rağmen, ömrü boyunca birçok bilim dalında çalışma yaptıysa da bilim camiasının hiçbir cephesinden asla kabul görmedi. Matematikçiler bile, açık bir kötü niyet ifadesi olmadan, "Mandelbrot'un ne olduğunu bilemeyiz, ama bizden değildir," diyorlardı.

Mandelbrot artık yolunu yavaş yavaş belirliyordu; bilim tarihinde kenarda köşede kalmış ve unutulmuş konular hakkındaki muazzam bilgisinin bunda çok yararı oldu. Matematiksel dilbilimi alanına el atarak kelimelerin dağılımına ilişkin bir yasayı izah etti. (Hikâyenin sembolizmi için özür dileyerek, bu sorunla nasıl karşılaştığını açıklarken, Paris'te metroda giderken elinde okuyacak bir şey olsun diye daha önce bir sırfi matematikçinin çöp sepetinde bulup aldığı bir dergiyi okurken bu problemi fark ettiğini ısrarla söyle-

miştir.) Oyun teorisi üzerinde araştırmalar yaptı. İktisat konusuna şurasından burasından girdi. Büyük ve küçük şehirlerin dağılımında boyutsuzlaşmanın düzenliliği hakkında bir makale yazdı. Çalışmalarını bir arada tutan genel çerçeve arka planda ve tamamlanmamış olarak kaldı.

IBM'de çalıştığı ilk zamanlarda, emtia fiyatları üzerindeki araştırmasını bitirdikten hemen sonra, şirketin patronunun da ilgisini çok çeken bir sorunla karşılaştı. Mühendisler, bir bilgisayardan bir başka bilgisayara enformasyon aktaran telefon hatlarındaki parazit sorunu karşısında çaresiz kalmışlardı. Elektrik akımı enformasyonu ayrı paketler halinde taşımaktadır; mühendisler de akımı güçlendirdikleri takdirde gürültüyü yok edebildiklerinin farkına vardılar. Fakat, kendiliğinden oluşan bir parazit vardı ki bunu bir türlü gideremiyorlardı. Bu parazit, arada sırada sinyalin bir bölümünü silmekte, böylece hata oluşmasına sebep olmaktaydı.

İletişimdeki gürültü doğası icabı gelişigüzel olmasına rağmen, kümeler halinde geldiği de gayet iyi bilinmektedir. İletişimdeki hatasız periyotların arkasından hatalı periyotlar gelmektedir. Mandelbrot, mühendislerle konuştuğu sırada, klasik düşünce biçimlerinden hiçbirine uymadığı için hiçbir zaman kaydedilmemiş bulunan hatalar hakkında ağızdan ağıza dolaşan birtakım rivayetler bulunduğunu öğrendi: Mühendisler kümelere yakından baktıkça hata paternlerinin daha karmaşık olduğu kanısına varıyorlardı. Mandelbrot'un hataların dağılımını tanımlamak üzere geliştirdiği usul sayesinde, gözlenen paternleri tamamen öngörmek mümkün oldu. Fakat bunun da aşırıya kaçan bir özelliği vardı. Her şeyden önce, hatalar için *ortalama* bir oranı - saat başına, dakika başına ya da saniye başına düşen ortalama hata sayısını - hesaplamaya imkân vermiyordu. Mandelbrot'un şemasında, *ortalama* olarak, hatalar sonsuz bir dağınıklığa yaklaşıyordu.

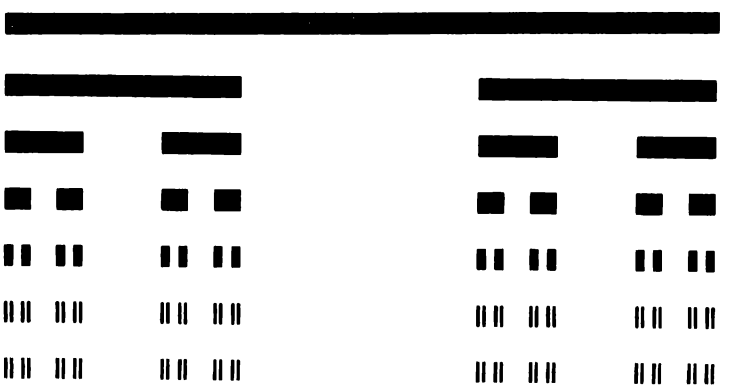
Mandelbrot'un betimlemesi, temiz iletişim periyotlarıyla hatalı periyotlar arasındaki ayrımı gittikçe daha belirgin hale getirmeye yönelikti. Bir günü saatlere böldüğünüzü farzedin. Bir saatin hiç hatasız geçmesi muhtemeldir. Sonraki bir saatte hatalar olabilir. Sonra tekrar hatasız bir saat geçebilir.

Sonra da hataların olduğu saati yirmişer dakikalık daha küçük periyotlara böldüğünüzü farzedin. Orada da, bazı periyotların tamamen temiz olduğunu, bazılarında ise hataların patlak verdiğini göreceksiniz. Gerçekte, Mandelbrot'un iddiasına göre, - sezginin aksine - hataların devamlı olarak içinde yayıldığı bir zamanı asla bulamazsınız. Hata patlak verdiği sırada, ne kadar kısa sürerse sürsün, daima iletişimin tamamen hatasız olduğu peryotlar da var olacaktır. Mandelbrot, ayrıca, hataların patlak verdiği anlar ile temiz iletişim aralıkları arasında tutarlı bir geometri ilişkisinin varlığını keşfetti. Bir saatlik ya da ikinci saatlik ölçeklerde, hatasız periyotların hata dolu periyotlara oranı sabit kalıyordu. (Bir keresinde, kurduğu şemayı nakzeden bir veri dizisi Mandelbrot'u dehşet içinde bırakmış; ancak, mühendislerin, durumla ilgisi olmadığı gerekçesiyle en aşırı durumları kaydetmeyi ihmal ettikleri sonradan ortaya çıkmıştı.)

Mühendislerin teorik çerçeve hakkındaki bilgileri Mandelbrot'un tanımlamasını anlamaya yeterli değildi, ama matematikçilerin bilgisi yeterliydi. Gerçekte, Mandelbrot'un yaptığı, on dokuzuncu yüzyılda yaşamış Georg Cantor adlı bir matematikçinin adına izafeten Cantor dizisi olarak bilinen soyut bir inşayı tekrarlamaktan ibaretti. Bir Cantor dizisi oluşturmak için, bir doğru parçasıyla gösterilen, sıfırla bir arasındaki sayı aralıklarıyla başlarsınız. Sonra ortadaki üçüncüyü kaldırırsınız. Böylelikle iki doğru parçası kalır, bunların da her birinin ortasındaki üçüncüyü (dokuzda birden dokuzda ikiye ve dokuzda yediden dokuzda sekize) kaldırırsınız. Geriye dört doğru parçası kalır, bunların da her birinin ortadaki üçüncülerini kaldırırsınız - buna böyle sonsuza kadar devam edersiniz. Geriye ne kalır? Noktalardan oluşan, kümeler halinde düzenlenmiş, sonsuz sayıda çok fakat sonsuz da dağınık garip bir "toz" kalır. Mandelbrot iletişimdeki hatalara zaman içinde düzenlenmiş bir Cantor dizisi olarak bakıyordu.

Çok yüksek soyutluk düzeyindeki[10] bu tanımlamanın, bir hatanın kontrolunda çeşitli stratejiler arasından seçim yapmak durumunda olan bilim adamları bakımından pratik bir

önemi vardı. Bunun anlamı, mühendislerin özellikle, paraziti gittikçe daha da azaltmak için sinyal gücünü arttırmak yerine, daha mütevazi bir sinyalde karar kılmaları, hataların önlenemezliğini kabullenmeleri ve bu hataları yakalamak ve düzeltmek amacıyla bir aşırı yayılma stratejisi uygulamaları demekti. Mandelbrot, IBM'in mühendislerinin gürültünün nedeni hakkındaki düşüncelerini de değiştirdi. Hatalar patlak verdikçe, mühendisler hep, elindeki tornavidayı bir yerlere sokan bir adamı aramaya koşuyorlardı. Oysa, Mandelbrot'un boyutsuzlaşma kalıpları gürültünün yerel düzeyde ortaya çıkan özel birtakım olaylarla izah edilemeyeceğini kanıtlıyordu.



CANTOR TOZU. Bir doğruyla başlayın; ortadaki üçüncüyü kaldırın; sonra kalan segmanların ortadaki üçüncüsünü kaldırın; ve böylece devam edin. Cantor dizisi geriye kalan noktaların oluşturduğu tozdur. Bu noktalar sonsuz sayıda çok, fakat toplam uzunlukları 0'dır.

Bu tür yapıların çelişkili nitelikleri on dokuzuncu yüzyıl matematikçilerini tedirgin etmiştir; Mandelbrot ise Cantor dizisini elektronik bir iletişim hattındaki hataların oluşmasının bir modeli olarak görmüştür. Mühendisler iletişimin hatasız olduğu periyotlar görmüşler; bu periyotlar hataların patlama halinde geldiği periyotlarla birbirine karışmıştır. Daha yakından bakıldığında, patlamaların da kendi içlerinde hatasız periyotlar içerdiği görülmektedir. Bu böylece devam etmektedir - bu bir fraktal zaman örneğidir. Mandelbrot, saatlerden saniyelere kadar her düzeydeki zaman ölçeğinde, hatalarla temiz iletişim periyotlarına oranının sabit kaldığını keşfetmiştir. İddiasına göre, intermitensinin modellenmesi bakımından bu tozlar vazgeçilmez niteliktedir.

Mandelbrot dünyadaki nehirlerden gelen diğer verilere de ilgi duyuyordu. Mısırlıların Nil'in yüksekliğine ilişkin tuttuğu kayıtlar binlerce yıl geriye gitmekteydi. Bu sorun öylesine gelip geçici bir ilgi gösterilecek bir konu değildi. Nil nehri anormal büyüklükte varyasyonlara uğramakta, bazı yıllar kabına sığmayıp etrafa taşmakta, bazı yıllar da suyu yatağında uslu uslu akmaya bile yetmemekteydi. Mandelbrot bu varyasyonu, iktisatta da geçerli olan iki tür etkinin ışığında tasnif etti ve bunlara Nuh Etkisi ve Yusuf Etkisi adlarını verdi.

Nuh etkisi süreksizliği ifade ediyordu: Bir büyüklük değiştiği zaman, bu değişiklik hemen hemen gelişigüzel bir süratle olmaktaydı. Ekonomistler genellikle, fiyatlardaki değişmelerin sürekli olduğunu - duruma göre, hızlı ya da yavaş olabilir - tasavvur etmişlerdir; bu süreklilik, değişme sırasında bir noktadan bir başka noktaya giderken yolları üzerindeki bütün ara düzeylerden geçtikleri anlamındadır. İktisat alanında uygulanan matematiğin büyük kısmı gibi, hareketin bu şekli de fizikten alınmıştır. Ama yanlıştır. Fiyatlar ani sıçramalarla değişebilir; aniden teleksten bir haber çıkması ve binlerce brokerin o anda fikir değiştirmeleri kadar hızlı olabilir. Mandelbrot'un iddiasına göre, borsaya ilişkin bir strateji, bir hisse senedinin fiyatının 60 Dolardan 10 Dolara inişi sırasındaki belirli bir noktada 50 Dolardan satılabileceğini varsayıyorsa o strateji başarısızlığa mahkûmdu.

Yusuf Etkisi[11] kalıcılık anlamına geliyordu. *Ve Mısır diyarında olan yedi bolluk yılı bitti. Ve Yusuf'un söylemiş olduğu gibi yedi kıtlık yılı gelmeğe başladı.* Tevratta anlatılan bu efsanede periyodiklik bahis konusu ise de bunun aşırı derecede basite indirgendiği apaçıktır. Halbuki, seller ve kuraklıklar kalıcıdır. Temelinde gelişigüzellik bulunmasına rağmen, bir yerde kuraklıktan ne kadar çok sıkıntı çekildiyse daha o kadar çok sıkıntı çekilecek demektir. Üstelik Nil'in yüksekliği üzerine yapılan matematiksel analizler kalıcılık özelliğinin asırlara damgasını vurduğu gibi son yıllara da damga vurduğunu gösteriyordu. Nuh ve Yusuf Etkilerinin farklı yönlere götürmesine rağmen, bir araya geldiklerinde ortaya

şu sonuç çıkmaktaydı: Trendler doğaları gereği gerçektir, fakat nasıl hızla geldilerse o kadar da hızla kaybolabilirler.

Geometrinin iki bin yıllık geçmişinde süreksizlik, gürültü patlamaları, Cantor tozları gibi fenomenlerin yeri olmamıştır. Klasik geometrideki şekiller doğrular ve düzlemler, daireler ve küreler, üçgenler ve konilerdir. Bunlar gerçeğin güçlü bir şekilde soyutlaştırılmasından meydana gelmiş ve Platon ahenginin güçlü felsefesine ilham kaynağı olmuşlardır. Öklid'in bunlardan çıkardığı geometri iki bin yıl sürmüştür; hâlâ birçok insanın hayatta öğrendiği tek geometri budur. Sanatçılar bu şekillerde ideal bir güzellik bulmuşlar, Ptolemeci gök bilimciler bunları esas alıp evren için bir teori kurmuşlardır. Ne var ki, kompleksliği anlamak için, bu şekillerdeki soyutluğun yanlış bir soyutluk türü olduğu ortaya çıkmaktadır.

Mandelbrot şu sözü söylemeye bayılırdı: "Bulutlar küre değildir."[12] Dağlar koni değildir. Şimşek doğru hat üzerinde yol almaz. Bu yeni geometrinin yansıttığı evren yuvarlak veya dümdüz olmayan, pütürlü, pürüzlü bir evrendir. Bu geometri girintili, çıkıntılı, kırık, bükük, birbirine karışmış, düğümlenmiş şekillerin geometrisidir. Doğanın karmaşıklığını anlamak için, bu karmaşıklığın sadece gelişigüzellikten oluşmadığı, sadece tesadüflerden oluşmadığı konusunda şüphe duymak gerekir. Mesela, şimşeğin izlediği yolun en ilginç özelliği yönü değil, zikzaklarının nasıl bir dağılıma sahip olduğudur. Mandelbrot'un çalışmaları dünyanın bir özelliği hakkında bir iddiayı ortaya koymuştur: bu iddiaya göre, bu gibi tuhaf şekillerin anlamı vardır. Girintiler ve bükümleri sadece Öklid geometrisindeki klasik şekilleri bozan kusurlar olarak görmemek gerekir. Bunlar çoğu zaman, bir fenomenin özünün sırrını açmaya yarayan anahtarlardır.

Mesela bir sahil şeridinin özü, gerçek doğası nedir? Mandelbrot'un bu suali sorduğu şu makalesi, düşünce hayatının dönüm noktasını teşkil etmiştir: "İngiltere Sahillerinin Uzunluğu Nedir?"

Mandelbrot sahil şeridi sorununa Lews F. Richardson adlı bir İngiliz bilim adamının öldükten sonra yayınlanan pek

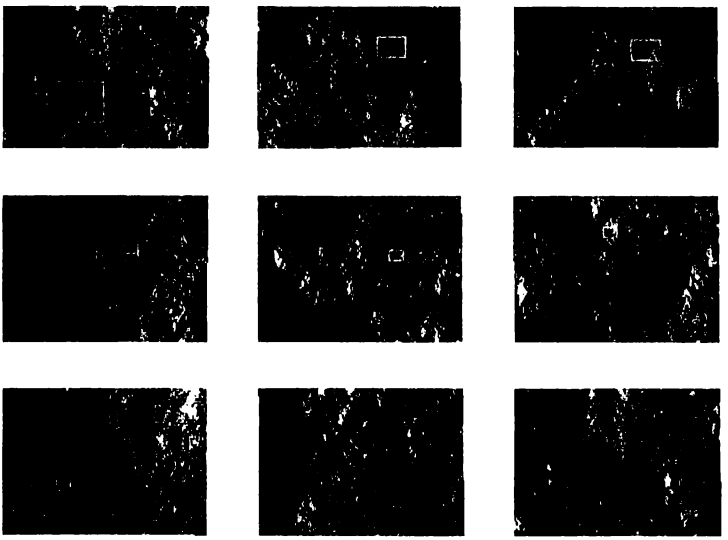
duyulmamış bir makalesi dolayısıyla vâkıf olmuştu; Richardson'un kenarından köşesinden değindiği birçok sorun sonradan kaosun bir bölümünü teşkil etmiştir. 1920'li yıllarda, sayısal hava durumu tahmini hakkında bir makale yazmış, akışkanlardaki türbülansı incelemek için Cape Cod Kanalına bir çuval yaban havucu atmış ve 1926'da yayınladığı bir makalede "Rüzgârın da Hızı Var mıdır?" diye sormuştu ("Soru ilk bakışta saçma görünebilir ama içine girdikçe haklı olduğu anlaşılmaktadır," diye yazmıştı.) Richardson, sahilleri ve ülkeler arasındaki eğri büğrü sınırları merak edip[13] İspanya ve Portekiz ile Belçika ve Hollanda'daki ansiklopedileri karıştırmış ve bu ülkelerin ortak sınırlarının tahmini uzunlukları arasında yüzde yirmi oranında farklar bulunduğunu keşfetmişti.

Mandelbrot'un bu konuda yaptığı analiz, dinleyenler tarafından ya gerçeğin acı bir ifadesi olarak ya da saçmalık derecesinde yanlış olarak değerlendirildi. Mandelbrot birçok kimsenin bu soruya şu iki cevaptan birini verdiğini görüyordu: "Bilmiyorum, benim konum değil," ya da "Bilmiyorum, ama ansiklopediye bakıp araştırırım."

Mandelbrot'un iddiasına göre, aslında her sahil - bir bakıma - sonsuz uzundu. Bir başka bakış açısından, bu sorunun cevabı elinizde tuttuğunuz cetvelin uzunluğuna bağlıydı. Mantıklı bir ölçme metodu düşünün: Bir sörvey uzmanı bir pergel takımı alsın, iki ucu arasında bir metre* açıklık olacak kadar açsın sonra da sahil boyunca pergeli yürütsün. Sonuçta ortaya çıkacak metre adedi gerçek uzunluk için yaklaşık bir değer tahmin etmekten ibaret olacaktır, çünkü pergel bir metrenin altındaki girinti ve çıkıntıları atlayacak, fakat sörveyci her halde pergelin her adımını kaydedecektir. Sonra, pergelin açıklığını daha küçültsün - mesela elli santimetre** - ve işlemi tekrarlasın. Bu ölçümde bulacağı uzunluk daha fazla olacaktır, çünkü pergel daha çok ayrıntıyı yakalayacak ve bu kez, elli santimetrelik iki adım evvelce bir

*İngilizce metinde 'yarda' - uzunluğu yaklaşık 91 cm olan bir İngiliz uzunluk ölçü birimi. (ç.n.)

**İngilizce metinde bir fut. (ç.n.)



FRAKTAL BİR SAHİL. Bilgisayarda oluşturulmuş bir sahil şeridi: Ayrıntılar gelişigüzeldir, fakat fraktal boyut sabit olduğu için, resim ne kadar büyütülürse büyütülsün pürüzlülük ya da düzensizlik derecesi aynı görünmektedir.

metrelik bir adımın kapsadığı mesafeyi kapsamaya yetmeyecektir. Bu yeni sayıyı da kaydetsin, pergelin aralığını on santimetreye* indirsin ve tekrar başlasın. Hayali pergelin kullanıldığı bu zihni deneyle, bir nesneyi farklı uzaklıklardan, farklı ölçeklerde gözlemenin etkisini kantifiye etmek imkânı sağlanmaktadır. Bir uydudan bakıp İngiltere sahillerinin uzunluğunu kestirmeye çalışan bir gözlemci yapacağı tahminde, sahil boyunca bütün burunları ve plajları dolaşan bir gözlemcinin yapacağı tahmine göre daha düşük bir değer bulacaktır; kaldı ki, bu ikinci gözlemcinin yapacağı tahmin de sahildeki her taşı aşıp yol alan bir salyangozun tahminine göre daha düşük olacaktır.

Sağduyumuz bize, bu tahminlerin durmadan artacak olmakla birlikte, şu veya bu şekilde bir nihai değere, yani sahilin gerçek uzunluğuna yaklaşacağını söyler. Başka bir ifadeyle, ölçüler sonunda birleşmek zorundadır. Aslında, sahil Öklid

*İngilizce metinde dört inç. (ç.n.)

geometrisindeki şekillerin birinde, mesela daire şeklinde olsaydı, gittikçe daha küçülen doğru parçalarını bir araya toplama yöntemiyle yapılan ölçüler gerçekten de sonunda birleşirdi. Mandelbrot'un buluşuna göre, bir ölçek küçüldükçe ölçülen sahil uzunluğu sınırsız olarak artmakta, körfez ve yarımadalardan daha da küçük körfezcikler ve yarımadacıklar çıkmakta ve bu işlem ancak en sonda, atom ölçeğine kadar indikten sonra gerçekten sona ermektedir. Belki ermektedir.

Öklid tarzı ölçümlerin - uzunluk, derinlik, kalınlık - düzensiz şekillerin özünü yakalamakta yetersiz kalması üzerine, Mandelbrot değişik bir kavrama, boyut fikrine yönelmiştir. Boyut bilim adamlarına, bilimle ilgisi olmayanlara nazaran çok daha fazla imkânlar sağlayan bir niteliktir. Bizler üç boyutlu bir dünyada yaşıyoruz, bunun anlamı bir noktanın adresini belirlemek için üç sayıya ihtiyaç duymamız demektir: mesela, enlem, boylam ve yükseklik. Üç boyut birbirlerine gönye olarak birleşen yönler olarak düşünülür. Bu bize hâlâ Öklid geometrisinden kalma bir mirastır; buna göre, uzayın üç boyutu, bir düzlemin iki boyutu, bir doğrunun bir boyutu, bir noktanın ise sıfır boyutu vardır.

Öklid'in bir ya da iki boyutlu nesneler tasarlamasını mümkün kılan soyutlama süreci[14] günlük haytta kullandığımız eşyalarda da tezahür etmektedir. Pratik amaçlarla kullandığımız bir yol haritası, esas itibariyle iki boyutlu bir şeydir; bir düzlemden alınmış bir parçadır. Tamamen iki boyutlu türdeki enformasyonu aktarmak üzere iki boyuttan yararlanmaktadır. Gerçekte, tabii ki, her şeyin üç boyutu olduğu gibi yol haritalarının da üç boyutu vardır, ancak kalınlıkları o kadar azdır ki (ve kullanıldıkları amaç bakımından da gereksizdir) unutulmasında sakınca yoktur. Aslında, bir yol haritası, katlandığı zaman bile iki boyutlu kalır. Aynı şekilde, bir iplik gerçekte tek boyutludur, bir parçacığın da gerçekte hiç boyutu yoktur.

Öyleyse bir iplik yumağının boyutu nedir? Mandelbrot şöyle cevap veriyor: "Bu sizin bakış açınıza bağlı." Uzaktan bakarsanız yumak, bir nokta kadar görüneceğine göre sıfır boyutludur. Yakına gelirse yumak, bir kürenin uzayını dol-

duran biçimde görüneceğinden üç boyutu olacaktır. Daha da yakından bakılırsa iplik görüneceğinden nesne gerçekte tek boyutlu hale gelir, halbuki bu tek boyut da şüphesiz kendi üzerine öyle bir şekilde sarılmıştır ki üç boyutlu bir uzayı kullanmaktadır. Bir noktayı belirleyebilmek için kaç sayıya gerek duyulduğu kavramı bu bakımdan çok yararlı olmaktadır. Uzaktan, hiç gerek yoktur, çünkü her şey bir tek o noktadan ibarettir. Yakından, üç sayıya gerek vardır. Daha da yakından, bir sayı - iplik ister gerilip uzatılmış ister bir yumak halinde sarılmış olsun, ipliğin bütün uzunluğu boyunca herhangi bir pozisyonu yeterlidir.

Mikroskopik ölçeğe indiğimizde: iplik üç boyutlu sütunlara dönmekte, sütunlar tek boyutlu elyafa dönüşmekte, sonra da bu malzeme sıfır boyutlu noktalar halinde çözülmektedir. Mandelbrot, matematik dışına çıkıp relativiteye çağrıda bulunmuştur: "Sayısal bir sonucu, nesnenin gözlemciyle ilişkisine bağlıyan görüş,[15] asrımızda fiziğin ruhunu teşkil etmektedir; hatta bunun gayet açık bir örneğidir."

Felsefeyi bir yana bırakırsak bir nesnenin gerçek boyutu dünya üzerindeki üç boyutundan farklı olabilmektedir. Mandelbrot'un yukardaki sözleriyle belirttiği iddiasındaki zayıf nokta, "uzaktan bakıldığında" ve "biraz daha yakına gelindiğinde" gibi müphem kavramlara bağlı olmasıdır. Bu ikisi arasında ne olmaktadır? Hiç şüphe yok ki, iplik yumağının üç boyutlu bir nesne halinden tek boyutlu bir nesne haline geçişinin belirli bir sınırı yoktur. Halbuki, bu geçişlerin iyi tanımlanmamış doğası, bir zayıflığın emaresi olmadığı gibi, boyut sorununa ilişkin yepyeni bir görüşün doğmasına da sebep olmuştur.

Mandelbrot 0, 1, 2, 3 . . . boyutlarını aşıp gözle görünen bir imkânsızlığa yönelmiştir: kesir boyutlar. Bu yaklaşım, kavram düzeyinde ip cambazlığından başka bir şey değildir. Matematikçi olmayanlar bakımından, gönüllü olarak, itimatsızlığın bir yana bırakılmasını gerektirmektedir. Bununla birlikte olaganüstü güçlü bir yaklaşımdır.

Kesir boyut başka türlü açıkça izahı yapılamayan nitelikleri ölçmenin bir yolu haline gelmiştir; bunlar, bir nesnedeki

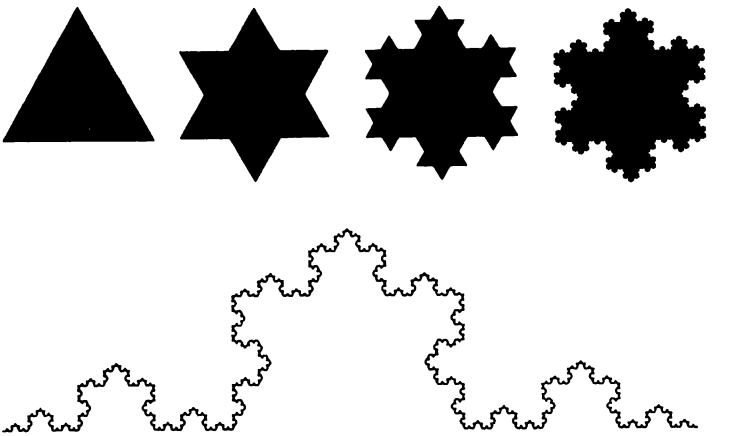
pütürlülük veya kırıklık ya da düzensizlik derecesi gibi niteliklerdir. Mesela kıvrımlar halindeki bir sahil şeridi, *uzunluk* birimi kullanılarak ölçülemez halde olmasına rağmen, belirli bir pütürlülük derecesi özelliğine sahiptir. Mandelbrot gerçek nesnelerin kesir boyutunu hesaplama biçimlerini, bir şekli inşa etmek için gerekli bazı tekniklere ya da bazı verilere bağlı olarak belirlemiştir; doğada incelediği düzensiz şekiller hakkındaki bir iddiasını kendi geometrisi sayesinde ortaya koyması mümkün olmuştur. İddiası şöyle idi: Ölçekler değiştiğinde düzensizlik derecesi sabit kalır. Şaşılacak olan şey, sık sık bu iddianın doğru çıktığı görülmektedir. Yeni baştan tekrar söyleyelim: Dünyamız düzenli bir düzensizliği sergilemektedir.

1975 yılında, bir kış gününün öğleden sonrasında,[16] fizikte de paralel akımların boy gösterdiğinden haberdar olan ve ilk büyük eserini kitap halinde yayınlamaya hazırlanan Mandelbrot, kendi şekilleri, boyutları ve geometrisi için bir isim bulması gerektiğini düşünüyordu. Oğlu okuldan gelmişti; Mandelbrot oğlunun Latince sözlüğünü tesadüfen eline almış, karıştırmaktaydı. Sayfaları çevirirken gözüne *fractus* sıfatı ilişti; kırılmak anlamındaki *frangere* fiilinden türemiş bir sıfattı. Aynı kökten gelen İngilizce *fracture* ve *fraction* * kelimelerinin sesine de uygun düşüyordu. Bunun üzerine Mandelbrot *fraktal* kelimesini icat etti (isim ve sıfat olarak, İngilizce ve Fransızca.)

Aklın gözüne göre, bir fraktal sonsuzu görebilmenin bir yoludur.

Her kenarı otuz santimetre** uzunluğunda bir üçgen düşünün. Şimdi de belirli bir transformasyonu - özel, iyi tanımlanmış kolayca tekrarlanabilir bir kurallar dizisini - düşünün. Üçgenin her kenarının ortasındaki üçte birini alın ve bunlarla yeni bir üçgen meydana getirin; yeni üçgen diğerinin, şekil olarak aynı, büyüklük olarak da üçte biri kadardır.

*Sırasıyla "kırılma, kırık" ve "kesir". (ç.n.)
**İngilizce metinde bir fut. (ç.n.)



KOCH'UN KAR TANELERİ. "Mandelbrot bunları, "Kaba fakat sağlam bir sahil şeridi modeli," olarak tanımlıyor. Bir Koch eğrisi inşa etmek için kenar uzunlukları 1 olan bir üçgenle başlayın. Her kenarın ortasına üçte biri büyüklüğünde yeni bir üçgen ilave edin ve buna böylece devam edin. Sınırın uzunluğu 3 x 4/3 x 4/3 x 4/3 x . . .-sonsuz. Oysa alan, ilk baştaki üçgenin çevresine çizilmiş dairenin alanından daha küçük kalmaktadır. Böylece sonsuz uzun bir hat sonlu bir alanı çevrelemektedir.

Sonuçta ortaya Davud'un altı köşeli yıldızı çıkar. Otuzar santimetre* boyunda üç segman yerine şimdi bu şeklin çevresinde onar santimetrelik on iki segman vardır. Üç yerine altı ucu vardır.

Şimdi on iki kenardan her birini alın ve daha küçük üçgeni ortadaki üçüncüye bağlayarak transformasyonu tekrar edin. Sonra işlemi tekrar yapın ve sonsuza kadar da tekrarlamaya devam edin. Tıpkı Cantor dizisinin gittikçe daha dağınık hale gelmesi gibi, bu şeklin çevresi de gittikçe daha detaylı bir görünüm kazanır. Bir nevi ideal bir kar tanesine benzer. 1904 yılında İsveçli matematikçi Helge von Koch'un bu şekli ilk kez tanımlamış olması dolayısıyla Koch eğrisi - bir eğri, bağlantılı olan doğru ya da yuvarlak bir çizgidir - olarak bilinmektedir.

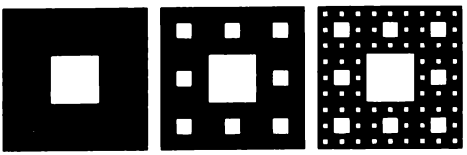
Daha yakından incelendiğinde, Koch eğrisinin bazı ilginç özellikleri olduğu görülmektedir. En başta, sürekli bir sar-

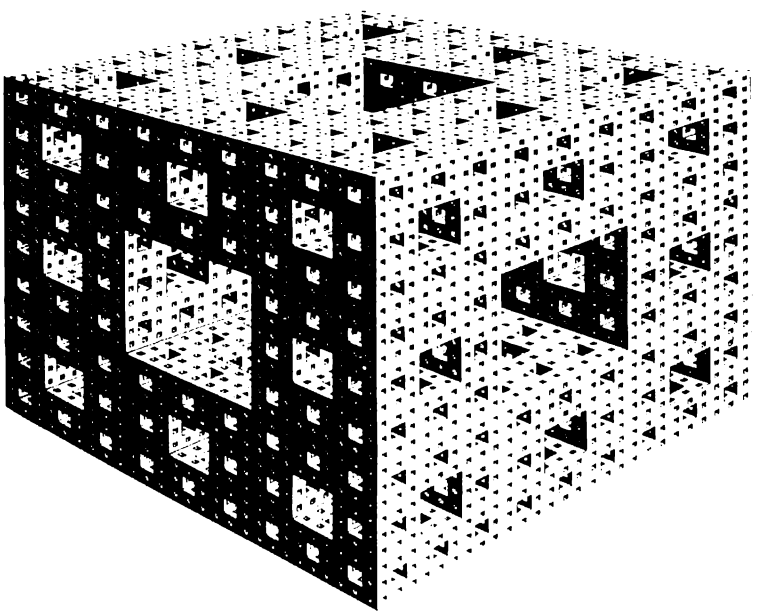
*İngilizce metinde bir fut. (ç.n.)

maldır, kendi kendini kesmez, çünkü her bir kenardaki yeni üçgenler birbiriyle çarpışma ihtimali bulunmayacak kadar küçüktür. Her transformasyon işleminde eğrinin içine bir miktar daha alan eklenmektedir, fakat toplam alan sonludur, gerçekte başlangıçtaki üçgenin alanını çok fazla geçemez. Başlangıçtaki üçgenin etrafına bir daire çizseniz Koch eğrisi de katiyen bu dairenin dışına taşmaz.

Buna karşılık, eğrinin kendisi sonsuz uzundur, tıpkı, sınırları olmayan bir evrenin ucuna kadar uzanan bir Öklid doğrusu kadar uzundur. İlk transformasyon sırasında otuz santimetrelik bir segmanın, yerini on santimetrelik dört segmanın alması gibi, her transformasyon toplam uzunluğu dört bölü üç oranında çoğaltmaktadır. Bu çelişkili sonuç, yani sonlu bir mekânda sonsuz bir uzunluk bulunması, asrın başlarında bu konu üzerine eğilen matematikçilerin birçoğunu tedirgin etmiştir. Koch eğrisi bir canavardı; şekiller konusunda mantık çerçevesindeki sezgilerin hiçbirine uyum göstermediği gibi - artık söylenmesi bile fuzuli - tabiatta bulunabilecek her şeyden patolojiye varan derecede farklıydı.

Bu şartlar içinde, bu matematikçilerin yaptığı çalışmaların o zamanlarda pek etkisi olmadı; fakat herkesten farklı düşünen birkaç matematikçi, Koch eğrisinin acayip özelliklerinin bir kısmını haiz olan başka birtakım şekiller de tasavvur ettiler. Bunlar arasında Peano eğrilerini sayabiliriz. Sierpinski halıları ve Sierpinski contaları da bahse değer. Bir halı yapmak için bir kareyle başlayın, bunu üçerden dokuz eşit kareye bölün ve merkezdekini çıkarın. Sonra kalan sekiz kare için aynı işlemi tekrarlayarak her birinin merkezinde bir karelik boşluk bırakın. Conta da aynı şeydir, ancak karelerin yerine eşkenar üçgenlerle yapılır; bunda tasavvur edilmesi zor olan özellik, her gelişigüzel noktanın bir dallanma noktası olması, yapıda bir çatallanma meydana getirmesidir. Bunu tasavvur etmenin zor olduğunu sanabilirsiniz fakat, Eiffel Kulesini[17] düşünürseniz bunun üç boyutlu iyi bir yaklaştırma olduğunu, kirişlerinin, takviyelerinin ve putrellerinin dallanarak gittikçe daha incelen elemanlardan meydana gelmiş bir kafes, çok ince detaylar içeren göz alıcı bir ağ oluşturdu-





DELİKLERLE İNŞAAT YAPMAK. Yirminci yüzyılın başlarındaki, birkaç matematikçi sonsuzca çok sayıda parçalar ekleme ya da çıkartma tekniği ile yapılmış canavar görünümlü nesneler tasarlamışlardır. Bu şekillerden birisi de Sierpinski halısıdır, bir karenin ortasındaki dokuzda biri kesilerek, sonra geriye kalan sekiz küçük karenin ortalarını kesip çıkararak, ve böylece devam ederek inşa olunur. Bunun üç boyutlu analogu Menger süngeridir; bu da sonsuz yüzeyi, fakat sıfır hacmi olan sağlam görünüşlü bir kafestir.

ğunu gözünüzün önüne getirebilirsiniz. Tabii ki, Eiffel bu işlemi sonsuza kadar devam ettirememiş, ancak yapının dayanım gücünden hiç kaybetmeden ağırlığı gidermesine imkân veren teknik inceliği değerlendirmeyi başarmıştır.

Zihin kompleksliğin sonsuzca kendi üzerine kapanmasını tahayyül edemez. Halbuki, bir yapının gittikçe incelerek bu tarzda tekrarlanması, şekiller konusunda bir geometricinin görüş açısından bakan bir kimseye yepyeni ufuklar açacaktır. Bu şekilleri incelerken, zihnin parmaklarıyla lastikten yapılmış bir cismin kenarlarını yoğururcasına bu şekillerin sağladığı imkânlarla adeta oyunlar oynanmakta ve Mandelbrot, daha önce hiç kimsenin görmediği veya anlamadığı varyasyonları görmekten çocukça bir haz duymaktaydı. Adı olmayan varyasyonlara Mandelbrot isimler takıyordu: ipler ve sayfalar, süngerler ve köpükler, kesmikler ve contalar.

Kesir boyut bu konuda kullanılabilecek ideal kıstastı. Düzensizliğin derecesi, bir bakıma, bir nesnenin uzayda bir mekân işgal etmekteki etkinliğine tekabül ediyordu. Basit, tek boyutlu bir Öklid doğrusu uzayda hiç yer işgal etmez. Fakat eğrisinin çevresi, sonlu bir alanı dolduran sonsuz uzunluğu ile mekân işgal eder. Koch eğrisi noktadan daha fazla, ancak düzlemden daha az bir şeydir. Tek boyutlu bir şekilden daha fazla, ancak iki boyutlu bir şekilden daha azdır. Mandelbrot, yüzyılımızın başlarındaki matematikçilerin ortaya çıkardığı,[18] fakat sonradan tamamen unutulmuş bulunan bazı teknikleri kullanarak kesir boyutun özelliklerini doğru bir biçimde belirlemiştir. Koch eğrisi için, dört bölü üçlerle sonsuza kadar tekrarlanarak yapılan çarpım ise 1.2618'lik bir boyut vermektedir.

Mandelbrot araştırmalarını bu tarzda ilerletmekle, bu gibi şekiller üzerinde daha önce kafa yormuş bulunan başka birkaç matematikçiye göre, iki konuda büyük üstünlük elde etmiştir. Birincisi, IBM gibi bir firmanın bilgisayar imkânlarının kendisinin yararlanmasına açık olmasıdır. Yaptığı işler, bilgisayarların yüksek hızlı bir budalalıkla gerçekleştirdikleri o özel çalışma biçimlerine gayet uygun düşüyordu. Tıpkı meteorologların, aynı birkaç hesap işlemini, atmosfe-

rin birbirine yakın milyonlarca noktasında gerçekleştirmek zorunda oluşları gibi, Mandelbrot da kolayca programlanmış bir transformasyonu tekrar, tekrar, tekrar ve gene tekrar gerçekleştirmek gereğini duymuştur. Deha transformasyonları kavramsallaştırır. Bilgisayarlar bunları resmeder, zaman zaman ortaya hiç umulmadık sonuçlar da çıkar. Yirminci yüzyılın başlarındaki matematikçiler kısa zamanda, kafalarını hesaptaki zorluk duvarına çarpmışlardır; bunların durumu tıpkı mikroskobu olmayan patobiyologların engellerle karşılaşmalarına benzer. Gittikçe daha ince ayrıntılara inen bir evreni incelerken, hayal gücünün de kendine göre bir sınırı vardır.

Mandelbrot'un sözleriyle: "Matematikte yüzyıl süren uzun bir dönem[19] boyunca çizimin hiçbir rolü olmadı, çünkü el, cetvel ve kalemle yapacağını tamamen yapmış, artık işi bitmişti. Bu çizgiler iyice öğrenilmişti; artık ön planda değillerdi. Üstelik bilgisayar da henüz ortada yoktu.

"Ben bu oyuna dahil olduğumda, sezginin tamamen eksik olduğunu fark ettim. Sezginin sıfırdan başlayıp yaratılması icap ediyordu. Alışılagelmiş araçlarla - el, cetvel ve kalem gibi - eğitimi yapılan sezgi bu şekillerin canavarca bir görünüme ve patolojik niteliğe sahip olduğunu keşfetmiştir. Eski sezgi insanı tamamen yanlış yola götürmekteydi. İlk resimler benim için tam bir sürpriz oldu; ondan sonra bazı resimleri eski resimlerden yararlanarak tanımaya başladım ve bu böylece devam etti.

"Sezgi insanda tanrı vergisi olarak bulunmaz. Ben sezgimi eğiterek başlangıçta saçma bulduğu için reddettiği şekilleri sonradan apaçık şekiller olarak kabul etmesini sağlamışımdır; herkesin de aynı şeyi yapabileceğini sanıyorum."

Mandelbrot'un ikinci üstün tarafı, pamuk fiyatlarıyla, elektronik iletişimdeki parazitle ve nehirlerdeki sel taşkınlarıyla karşılaşması üzerine gerçeğin resmini zihninde şekillendirmeye başlamış olmasıydı. Resim şimdi artık belirgin hale gelmeye başlamıştı. Gerek düzensiz paternleri tabii süreçler içinde incelemesinin gerekse sonsuz karmaşık şekilleri araştırmasının temelinde aynı kavram bulunuyordu: *Ken-*

di kendine benzerlik niteliği. Herşeyden öteye, fraktal kendine benzeyen demekti.

Kendi kendine benzerlik her düzeydeki ölçekte simetri demektir. İçeriğinde, başlanan yere geri dönülmesi, patern içinde patern bulunması vardır. Mandelbrot'un fiyat grafikleriyle nehir grafiklerinde kendi kendine benzerlik ortaya konmuştur; çünkü yalnızca, ayrıntıları gittikçe daha ince ölçeklerde ortaya çıkarmakla kalmamış, ayrıntıları belirli bazı sabit ölçülerde de meydana çıkarmıştır. Koch eğrisi gibi canavar görünümlü şekiller kendi kendine benzerlik sergiler, çünkü büyük çapta büyütüldüğü zaman bile tamamen aynı görünümü muhafaza eder. Kendi kendine benzerlik eğrileri oluşturma tekniğinin bünyesinde de mevcuttur - aynı transformasyon gittikçe daha küçük ölçeklerde tekrarlanır. Kendi kendine benzerlik kolaylıkla tanınıp ayırt edilebilen bir niteliktir. Kültürde, bunun canlı örneklerini her yerde görmek mümkündür: İki ayna arasında duran bir insanın hayalinin sonsuz derinlikte yansımasındaki ya da küçük bir balığı yiyen bir balığı yiyen daha büyük bir balığı yiyen daha büyük bir balığı gösteren bir karikatürdeki gibi. Mandelbrot Jonathan Swift'in şu sözlerini tekrarlamaktan hoşlanır: "Tabiatçının baktığı, Pirenin biri/ Olmuş daha küçük Pirelerin yemi,/Var o küçük pireleri de ısıranlar/ Hikayemiz sürer böyle sonsuza kadar."

Amerika Birleşik Devletleri'nin kuzeydoğusunda,[20] deprem araştırmaları için en iyi yer olan The Lamont-Doherty Geophysical Observatory (Lamont-Doherty Jeofizik Rasathanesi), New York Eyaletinin güneyinde, Hudson Nehrinin hemen batısındaki ormanların içine saklanmış dış görünüşü itibariyle pek cazip olmayan binalarda yerleşmiş bulunmaktadır. Lamont-Doherty, Columbia Üniversitesi profesörlerinden Christopher Scholz'un yeryüzü kabuğunun şekli ve yapısı üzerinde ihtisas yaparken, çalışmaya fraktalları düşünmekle başladığı yerdir.

Matematikçiler ve teorik fizikçiler Mandelbrot'un çalışmalarına ilgi göstermezken Scholz fraktal geometri araçlarını alıp hemen kullanmaya hazır olan tamamen pragmatik ka-

rakter yapısına sahip bir araştırıcıydı. Benoit Mandelbrot'un adını 1960'lı yıllarda, Mandelbrot'un daha iktisat alanında çalıştığı günlerde duyduğunda, Scholz da M.I.T.'de lisansüstü düzeyinde öğrenciliğine devam ediyor ve vaktinin büyük kısmını depremlerle ilgili çok zorlu bir konuda harcıyordu. Büyük ve küçük depremlerin dağılımının özel bir matematik paternini takip ettiği, bunun da serbest piyasa şartlarının bulunduğu bir ekonomideki kişi başına gelirlerin dağılımına hükmeder görünen boyutsuzlaşma paterninin aynı olduğu yirmi yıldan beri artık gayet iyi anlaşılmış bulunuyordu. Yapılan gözlemler, bu dağılımın dünyada, depremlerin sayılıp ölçülebildiği her yerde bulunduğunu gösteriyordu. Depremlerin ne kadar düzensiz ve öngörülemez olduğu bir yana bırakılırsa ne türden fiziksel süreçlerin bu düzenliliği izah edebileceği sorusunu sormaya değerdi. Ya da Scholz'a öyle geliyordu. Sismologların birçoğu bu olguyu böylece kaydedip işlerine devam etmekten dolayı gayet mutluydular.

Scholz Mandelbrot'un adını hatırladı ve 1978'de bol resimli, acayip ukala ve denklemlerle dolu bir kitap satın aldı; kitabın adı *Fractals: Form, Chance and Dimension* (Fraktallar: Şekil, Tesadüf ve Boyut) idi. Sanki Mandelbrot evren hakkında bildiği ya da şüphe ettiği ne varsa hepsini karman çorman edip bu tek ciltlik eserin içinde toplamıştı. Birkaç yıl sonra, hem bu kitap hem de bunun genişletilmiş ve gözden geçirilmiş şekli olan *The Fractal Geometry of Nature* (Doğanın Fraktal Geometrisi) yüksek matematik alanında şimdiye kadar hiçbir kitaba nasip olmayan bir satış rakamına ulaştı. Bu kitap üslup bakımından takibi zor ve okuyanda umutsuzluk yaratan bir eserdir; yer yer de esprili, edebi ve saydamsızdır. Mandelbrot da eserini "bir manifesto ve bir derleme"[21] olarak adlandırmıştır.

Başka bir, iki bilim dalında faaliyet gösteren, özellikle tabiatın malzeme bölümü üzerinde çalışan birkaç bilim adamı gibi, Scholz da bu kitaptan nasıl yararlanacağını anlayabilmek için yıllarca düşünüp durdu. Hiçbir tarafında açıklık yoktu. Scholz, *Fraktallar* kitabından bahsederken, "Ne nasıl yapılır kitabı değil bir 'vay canına' kitabıdır."[22] diyordu. Fakat gene

de Scholz yüzeyler konusuna daha derinliğine ilgi göstermekteydi ve bu kitabın da her tarafı yüzeylerle doluydu. Mandelbrot'un fikirlerinin içinde yatan ümit ışıklarını düşünmekten kendini alamadığını fark eden Scholz, kendi bilim dünyasındaki parçaları tanımlamak, sınıflandırmak ve ölçmek için fraktallara başvurmanın bir yolunu bulmaya girişti.

Fraktallarla ilgili olarak birbiri ardına konferanslar ve seminerler düzenlenmesine daha yıllar vardı, ama, Scholz kısa zaman sonra, bu işte yalnız olmadığını fark etti. Fraktal geometrinin birleştirici fikirleri, kendi gözlemlerinin sadece kendi bilim dallarıyla ilişkili olduğunu düşünen ve bu gözlemlerini yorumlamak için hiçbir sistematik yönteme sahip olmayan bilim adamlarını bir araya getirdi. Cisimlerin birbirlerine nasıl karıştığını, birbirlerinden nasıl koptuğunu veya nasıl patlayıp dağıldıklarını araştıran bilim adamlarına fraktal geometriyi kavrayan yaklaşımların çok büyük yardımı oldu. Fraktal geometri malzemeye, yani, metallerin yüzeylerinde mikroskopla görülebilecek küçüklükteki pürüzlere, petrol içeren gözenekli kayalardaki ufacık deliklere ve kanallara, bir deprem bölgesindeki kırık arazi şekillerine bakmak için başvurulan bir yöntemdir.

Scholz'un düşüncesine göre, dünyanın yüzeyini, yani düz okyanuslarla kesiştiği yerlerde sahiller oluşan yüzeyi, tanımlamak jeofizikçilerin işiydi. Yerkabuğunun üst kısmında başka türden yüzeyler, çatlaklar içeren yüzeyler vardı. Faylar ve kırılmalar Yerin yüzeyinde o kadar yaygın bulunmaktadır ki, iyi bir tanım yapmaya kalkışırsanız elinizdeki anahtar mutlaka bunlardan olacaktır; hatta teraziye koysanız, üzerinde bulundukları malzemeden bile daha ağır basarlar. Kırıklar Dünyanın yüzeyini üç boyutlu olarak katedip Scholz'un alaycı bir ifadeyle "şizosfer" diye adlandırdığı örtüyü meydana getirirler. Toprağın altındaki akışkanların akışı - suyun akışı, petrolün akışı ve tabii gazın akışı - bunların kontrolu altındadır. Depremlerin davranış biçimini de bunlar kontrol eder. Demek ki, yüzeyleri kavramının çok büyük önemi vardı; halbuki, Scholz kendi mesleğinin bir çıkmazda bulunduğunu düşünüyordu. Gerçekte, hiçbir çerçeve mevcut değildi.

Jeofizikçiler de yüzeyleri herkes nasıl görüyorsa öyle, yani şekiller olarak görmüşlerdir. Bir yüzey düz olabilir. Yahut çok özel bir şekli de olabilir. Mesela bir Volkswagen tosbağanın çevre hatlarına bakıp bu yüzeyi bir eğri biçiminde çizebilirsiniz. Bu eğrinin, bildiğimiz Öklit usulleriyle ölçülmesi mümkündür. Buna uygun bir denklem bile düzenleyebilirsiniz. Ne var ki, Scholz'un betimlemesi açısından, bu yüzeye ancak dar bir spektrum bandından bakabilirsiniz. Sanki evrene bir kırmızı filtreden bakıyormuş gibi olursunuz - yani sadece ışığın bu dalga boyunda neler oluyorsa onları görürsünüz, başka renklerin dalga boyunda olan her şeyi kaçırsınız; üstelik, spektrumun kızıl ötesi radyasyon veya radyo dalgalarına tekabül eden bölümlerindeki o çok geniş faaliyet alanını da görmekten mahrum kalırsınız. Bu benzetmede, spektrumu ölçek olarak düşünmelisiniz. Volkswagen'in yüzeyini Öklid geometrisine göre tanımlanmış şekli açısından düşünmek demek, bu yüzeyi sadece on metre ya da yüz metre ötede duran bir gözlemcinin ölçeği ile görmek demektir. Ya bir kilometre veya yüz kilometre ilerdeki gözlemci açısından ne olur? Bir milimetre ötedeki, hatta bir mikron ötedeki gözlemci açısından ne olur?

Yerin yüzeyini uzaydan, yüz kilometre uzaktan göründüğü şekliyle çizdiğimizi düşünelim. Çizgimiz ağaçların ve tepelerin, binaların ve - bir yerlerde park etmiş olarak duran - bir Volkswagen'in üzerinden yukarı aşağı dolaşarak geçmektedir. Bu ölçekte, yüzey, birçok çıkıntılar arasındaki çıkıntılardan sadece biridir; biraz da gelişigüzel bir şeydir.

Yahut bir büyüteçle ve mikroskopla yaklaştırdığımız Volkswagen'e gittikçe daha yakından baktığımızı tasavvur edelim. İlk başta, tamponların ve motor kapağının yuvarlak hatları görüş alanından çıktıkça yüzeyi daha düzgünleşmiş gibi görünecektir. Sonradan çeliğin mikroskopik yüzeyinin de tümsekli olduğu, göze batacak kadar gelişigüzel bir biçimde ortaya çıkacaktır. Yani kaotik görünecektir.

Scholz, Yerin yüzeyinin özel girintili çıkıntılı biçimini betimlemek için fraktal geometrinin sağlam bir gereç görevi gördüğünü bulmuş; metalürjistler ise değişik çelik türlerinin yüzeyi

için aynı sonuca varmışlardır. Mesela, bir metalin yüzeyinin fraktal boyutunun verdiği enformasyonlar, çoğunlukla metalin dayanım gücünü ifade eden enformasyonların aynı olmaktadır. Yerin yüzeyinin fraktal boyutu da, aynı şekilde kendi önemli niteliklerine ışık tutmaktadır. Scholz klasik bir jeoloji oluşumunu ele almış, bir dağın yamacının altında biriken kaya parçalarını incelemiştir. Uzaktan bakıldığında bu oluşum iki boyutlu bir Öklityen şekildir. Halbuki, jeolog yakına geldikçe, artık yığının üzerinde değil içinde yürümektedir - yığın, araba büyüklüğündeki kaya parçaları olarak çözülmüş bulunmaktadır. Gerçek boyutu 2.7 olmuştur, çünkü kaya yüzeyleri dışarı fırlayarak veya içeri çökerek tıpkı bir süngerin yüzeyi gibi üç boyutlu uzayı hemen hemen tamamen doldurur.

Fraktal betimlemeler birbirleriyle temas halinde olan yüzeylerin özelliklerine ilişkin bir dizi problemin çözümünde hemen uygulanmışlardır. Bir araç lastiğinin yüzeyi ile beton arasındaki temas böyle bir problemdir. Makinelerin eklemleri arasındaki temas ya da elektrik kontağı da aynı şeydir. Yüzeyler arasındaki temasların haiz olduğu özellikler, bu yüzeylerin ait olduğu malzemelere hiç bağlı değildir. Bu özellikler, tümseklerin üstündeki tümseklerin de üstündeki tümseklerin fraktal niteliğine bağlı olan özelliklerdir. Fraktal yüzeyler geometrisinin basit olmakla birlikte çok sağlam bir sonucu, temas halindeki yüzeylerin her yere dokunmadığıdır. Her ölçek düzeyindeki tümsekler buna engel olur. Muazzam bir basınç altındaki kayaların içinde bile yeterince küçük bir ölçekte, bir akışkanın arasından akabileceği boşluklar kalmaktadır. Scholz, buna Humpty Dumpty* (Eğri Büğrü) Etkisi adını vermiştir. İşte bu yüzden, bir çay fincanı kırılıp iki parçaya ayrıldığında, kırık parçalar kabaca bir ölçekte birbirine uyar gibi görünse de asla bir araya getirilemez. Ölçek daha küçüldükçe, düzensiz tümseklerin birbirine denk düşmediği görülmektedir.

Scholz kendi alanında, fraktal teknikleri kullanan pek az sayıdaki bilim adamından biri olarak tanınmıştır. Meslektaşlarından bir kısmının, bu küçük gruba anormal gözüyle

*Bu isim, meşhur bir İngiliz çocuk şarkısından alınmıştır. (ç.n.)

baktıklarını bilmekteydi. Scholz, bir makalenin başlığında fraktal kelimesini kullandığında ya yeni gelişmeleri gayet yakından takip ettiği için hayranlıkla karşılanacağını ya da sırf günün modasına uyup ucuz başarıya göz kırptığı için eleştireleceğini düşünüyordu. Makalelerin kaleme alınış tarzında bile zor bir seçim karşısında kalıyor; fraktal taraftarlarından oluşan küçük bir okuyucu kitlesine mi yoksa temel kavramlar hakkındaki izahata bile ihtiyaç duyan geniş jeofizikçiler topluluğuna mı hitap edeceğine karar vermesi gerekiyordu. Fakat, her şeye rağmen, Scholz'a göre fraktal geometri gereçlerinden vazgeçmek mümkün değildi.

Scholz, "Bu tek model, Yeryüzünün değişen boyutlarını bütün kapsamıyla ele almamızı mümkün kılan modelin aynıdır,"[23] diyordu. "Betimlemeler ve öngörüler yapabilmemiz gerek duyduğumuz matematik ve geometri gereçlerini bize sağlamaktadır. Engeli aştığınız ve paradigmayı kavradığınız anda, gerçekten de fenomenleri ölçmeye ve düşüncelerinizi yeni bir doğrultuda geliştirmeye başlayabilirsiniz. Olguları bakış tarzınız da artık değişir. Yeni bir görüş açısı kazanırsınız. Bunun eski görüş açınıza benzeyen hiçbir yanı kalmamıştır - çok daha geniş bir bakış açısıdır."

Ne kadar büyüktür? Ne kadar sürecektir? Bunlar bir bilim adamının bir olguyla ilgili olarak sorduğu en temel sorulardır. Bu sorular insanların dünyayı algılayış biçiminin temelinde yatan düşünceleri temsil ettiği için, bunların belirli bir peşin hüküm ihtiva ettiğini görmek pek kolay olmaz. Bu soruların altında, büyüklük ve sürenin, yani ölçekle bağlantılı olan niteliklerin anlam ifade eden, bir cismi betimlemeye ya da sınıflandırmaya yarayan nitelikler olduğu düşüncesi yatmaktadır. Bir biyolog bir insanı betimlerken ya da bir fizikçi bir kuarkı betimlerken *büyüklüğü nedir* ve *süresi nedir* gibi sorular gerçekten anlamlı olmaktadır. Hayvanlar da, kendi kaba fiziksel yapıları içinde özel bir ölçeğe çok yakından bağlıdırlar. Bir insanın, bütün orantıları aynı kalmak kaydıyla normal boyunun iki katı bir ölçekte büyütüldüğünü düşünün; elinizdeki bu yeni yapının iskeleti, ağırlığına dayanamayıp çökecektir. Ölçek meselesi çok önemlidir.

Depremlerin fiziği genellikle ölçekten bağımsızdır. Büyük bir deprem sadece, küçük bir depremin ölçeği büyütülmüş bir biçimidir. Bu özellik depremleri hayvanlardan ayırt etmektedir; mesela yirmi beş santimetre* boyundaki bir hayvanın yapısı iki buçuk santimetre boyundaki bir hayvandan daha farklı olmak zorundadır; iki buçuk metrelik bir hayvana da, ağırlığı dolayısıyla kemiklerinin kırılmaması için daha farklı bir yapı gereklidir. Diğer taraftan, bulutlar tıpkı depremler gibi boyutsuzlaşma fenomenleridir. Karakterlerinin esasını meydana getiren düzensizlik - ki, bunları fraktal boyut itibariyle betimlemek mümkündür - farklı ölçeklerde gözlendiğinde hiçbir değişiklik göstermez. Bundan dolayı, uçak yolcuları bir bulutun uzaklığını belirleyebilecek her türlü perspektif duyusunu tamamen kaybederler. Bulutu fark etmemize yarayan mesela sis gibi birtakım belirtileri olmasa bulutun beş metre mi** yoksa beş yüz metre mi*** ilerde olduğunu anlamak mümkün olmaz. Gerçekten de, uydudan alınan resimlerin analizi yüzlerce kilometre uzaktan gözlenen bulutlarda değişmeyen bir fraktal boyut bulunduğunu göstermiştir.

Olguları düşünürken, ne kadar büyük oldukları ve ne kadar zaman sürdükleri gibi kıstaslarla tanımlama alışkanlığımızdan vazgeçmek çok zordur. Fraktal geometrinin iddiasına göre, doğadaki bazı elemanların kendi özelliklerine özgü bir ölçek aramaları hayalden başka bir şey değildir. *Kasırga*. Tanımı icabı, kasırga belirli büyüklükteki bir fırtınadır. Ancak, bu tanımı doğaya insanlar dayatmışlardır. Gerçekte, atmosferle uğraşan bilim adamları, şehirde bir sokağın köşesindeki süprüntü kâğıtları döndürerek uçuran ani bir rüzgârdan sadece uzaydan görülebilen devasa siklon sistemlerine kadar havadaki bütün karışıklıkların devamlı bir dizi oluşturduğunun bilincine varmışlardır. Kategoriler artık işe yaramamaktadır. Devamlı dizinin uçları, ortası ile tek bir bütün oluşturmaktadır.

*İngilizce metinde on inç. (ç.n.)
**İngilizce metinde yirmi fit. (ç.n.)
***İngilizce metinde iki bin fit. (ç.n.)

Akışkanların akış denklemlerinin birçok durumda boyutsuz olduğu, yani ölçeğinin ne olduğuna bakılmaksızın uygulandıkları görülür. Ölçeği küçültülmüş uçak kanatları ve gemi uskurları rüzgâr tünellerinde ve laboratuvar havuzlarında test edilebilmektedir. Bazı sınırlamaları bulunmasına rağmen, küçük fırtınalar da büyük fırtınalar gibi davranmaktadır.

Aorttan kılcal damarlara kadar bütün kan damarları, başka tür bir devamlı dizi meydana getirirler. Damarlar çatallanır ve bölünür, sonra tekrar çatallanır ve böyle devam ederek o kadar daralır ki sonunda kan hücreleri bu damarların içinde ancak tek sıra halinde kayarak ilerlemek zorunda kalır. Damarların dallanmasının doğası fraktaldır. Yapı itibariyle, Mandelbrot'un asrın başlarındaki matematikçileri tarafından tasarlanan canavarlaşmış hayali cisimlerden birine benzerler. Fizyolojik zorunluluk dolayısıyla, kan damarlarının boyutsal olarak biraz mucize göstermesi mecburidir. Mesela Koch eğrisinin sonsuz uzunluktaki bir doğruyu küçük bir alana sıkıştırması gibi, dolaşım sistemi de muazzam bir alanı sınırlı bir hacmin içine sıkıştırmak zorundadır. Bedenin kaynakları olarak ekonomik açıdan bakarsak, kan pahalı bir meta, mekân (yer) ise temininde güçlük çekilen bir lükstür. Doğanın tasarladığı fraktal yapı o kadar etkinlikle işlemektedir ki, dokuların birçoğunda, hücrelerin hiçbiri en yakındaki kan damarına üç ya da dört hücrelik mesafeden daha uzak değildir. Oysa, damarlar ve kan çok az yer tutar, bedenin yüzde beşinden fazla değildir. Mandelbrot bunu Venedik Tâciri Sendromu olarak izah etmektedir: Eti bir kilo da kesseniz bir miligram da kesseniz mutlaka kan akacaktır.

Bu mükemmel yapı - gerçekte birbiriyle iç içe girmiş biri atar damar ve biri toplar damar olmak üzere iki ağ - istisnai bir şey sayılmaz. İnsan vücudu buna benzer karmaşıklıklarla doludur. Sindirim sisteminde dokular kıvrım içinde kıvrım içerir. Akciğerler de en küçük bir mekâna mümkün olabilecek en büyük yüzeyi sıkıştırmak zorundadır. Bir hayvanın oksijen massetme yeteneği kabaca, ciğerlerinin yüzey alanıyla orantılıdır. Vasati bir insanın akciğerleri, tenis sa-

hasından daha büyük bir alanı sıkıştırılmış olarak içermektedir. Bu komplikasyonu daha da arttıran bir olgu olarak, hava borucuklarının atar ve toplar damarlarla etkin bir biçimde birleşmesi gerektiğini de ekleyelim.

Her tıp öğrencisi akciğerlerin çok büyük yüzey gösterecek bir şekle sahip olduğunu bilir. Ancak, anatomi uzmanları her keresinde tek bir ölçeğe - mesela, milyonlarca akciğer peteği, yani hava borucuklarının ucunda bulunan mikroskopik kesecikler düzeyinde - bakacak tarzda eğitilmişlerdir. Anatomi dili *her düzeydeki* ölçekte bulunan birliği karanlıkta bırakmak eğilimindedir. Buna karşılık fraktal yaklaşım bütün yapıyı, onu meydana getiren dallanma açısından kucaklar; bu dallanma sürekli olarak büyük ölçeklerden küçük ölçeklere doğru yönelir. Anatomi uzmanları kalp-damar sistemini incelerken kan damarlarını büyüklüklerine göre kategorilere ayırıp atar damarlar ve atar damarcıklar, toplar damarlar ve toplar damarcıklar olarak tasnif ederler. Bu kategorilerin, güdülen amaçlar bakımından, bazen faydalı olduğu görülür. Bazen de insanı yanılgıya sevkederler. Sadece ders kitaplarında yazılı olan yaklaşım insanı bazen gerçeğin etrafında dolaştırmaktan ileri götürmez: "Bir atar damar tipinin başka bir atar damar tipine kademeli olarak geçişi sırasında, zaman zaman ara bölgenin sınıflandırılmasında güçlükle karşılaşılır. Orta kalibreli bazı atar damarların daha büyük atar damarlar sınıfına özgü çeperleri vardır; buna karşılık bazı büyük atar damarların çeperleri de orta boy atar damarların çeperlerine benzer. Geçiş bölgeleri . . . çoğu zaman karma tip atar damarlar olarak gösterilir."[24]

Mandelbrot fizyolojiye ilişkin spekülatif görüşlerini yayınladıktan hemen sonra değil de, ancak on yıl geçtikten sonra bazı teorik biyologlar,[25] vücudun her tarafındaki yapıları kontrol eden fraktal organizasyonu bulmaya başlamışlardır. Bronşlardaki dallanmayı klasik "eksponansiyel" yaklaşımla betimlemenin yanlış olduğu meydana çıkmış; fraktal bir betimlemenin verilere daha uygun olduğu anlaşılmıştır. İdrar yolları sisteminin fraktal olduğu ortaya çıkmıştır. Karaciğerdeki safra kanalı. Kalbin içinde, elektrik akımının titre-

şimlerini kasılma halindeki kaslara taşıyan özel liflerden oluşmuş ağ.[26] Son olarak, kalp uzmanlarının His-Purkinje ağı adıyla tanıdıkları ve üzerinde özellikle önemli araştırmalar sürdürülen yapı. Sağlıklı ve anormal kalpler üzerinde yapılan hatırı sayılır çalışmalardaki başarıların, gerek sol gerekse sağ karıncıklardaki kas hücrelerinin kendi ritimlerini nasıl koordine ettikleri hakkındaki ayrıntılı bilgilere bağlı olduğu ortaya çıkmıştır. Kaos görüşüne yatkın birçok kardiyolog[27] kalp atışı ritmindeki frekans spektrumunun, tıpkı depremlerde ve ekonomik olaylarda olduğu gibi, fraktal kanunlara riayet ettiğini bulmuşlar ve kalp atışı ritmini anlamanın en önemli yollarından birinin His-Purkinje ağının (gittikçe küçülen ölçeklerde kendi kendine benzeyecek şekilde organize olmuş bir dallanmadan oluşan labirent) fraktal organizasyonu olduğunu öne sürmüşlerdir.

Doğa bu kadar karmaşık mimari yapıları oluşturmayı nasıl başarabilmiştir? Mandelbrot'un bu konudaki düşüncesine göre, komplikasyonlar sadece geleneksel Öklid geometrisi bağlamında mevcuttur. Dallanan yapılar, fraktallar olarak, saydam bir sadelikle, birkaç enformasyon kırıntısıyla betimlenebilir. Koch, Peano ve Sierpinski'nin tasarladığı şekilleri meydana çıkaran basit transformasyonların benzerleri, belki de bir organizmanın genleri içindeki kodlu talimatlarda bulunmaktadır. Şurası muhakkak ki, DNA akciğerdeki bronşların, hava borucuklarının, peteklerin ya da bunlardan çıkan ağacın mekân içindeki özel yapısının büyük rakamlara ulaşan sayısını belirleyebilecek bir durumda değildir; fakat tekrarlanan bir dallanma ve gelişme sürecini belirleyebilir. Bu tür süreçler tabiatın amaçlarına da uyum gösterirler. Kaz tüyünde akıl almaz bir özellik olarak bulunan havayı hapsetme yeteneğinin, ancak, tüyün ana protein maddesi olan keratindeki fraktal düğümlerden ve dallardan kaynaklandığı nihayet öğrenildikten sonradır ki, E.I. DuPont de Nemours & Company ile Amerika Birleşik Devletleri Kara Kuvvetleri kaz tüyünün dengi olan sentetik bir maddeyi üretmeye başlayabilmişlerdir.[28] Mandelbrot, gayet doğal bir biçimde, akciğer ve damar ağaçlarından gerçek botanik ağaçlarına, güneş

ışığını emmeye ve rüzgâra karşı dayanmaya ihtiyaç duyan, fraktal dalları ve fraktal yaprakları olan ağaçlara geçmiştir. Teorik biyologlar da fraktal boyutsuzlaşmanın sadece ortak bir özellik olmayıp morfogenez bakımından evrensel olduğu yolunda spekülâsyonlara başlamışlardır. Bundan sonra biyolojnin önündeki en büyük sorunun, bu gibi şekillerin nasıl kodlandığını ve bu yapıların nasıl gerçekleştiğini kavrayabilme sorunu olduğunu öne sürmüşlerdir.

"Bu gibi fenomenleri bulmak için bilimin çöp tenekelerini karıştırmaya başladım, çünkü benim gözlediğim olayın bir istisna olmayıp belki de çok yaygın bir olgu olduğundan şüphelendim. Konferanslara katıldım ve piyasada pek fazla görülmeyen dergileri karıştırdım; çoğundan bir sonuç çıkmadı ama, arada sırada ilginç şeylere rastladığım da oldu. Buna bir bakıma tabiatçı yaklaşımı da diyebilirsiniz; teorisyen yaklaşımı değildir bu. Neyse ki oyunu oynadığıma değdi."[29]

Doğa ve matematik tarihi hakkında bir hayat boyu geliştirdiği düşünceleri bir kitapta toplayan Mandelbrot, akademik çevrelerden hiç umulmadık bir ilgiye mazhar olmuştur. Elinden düşürmediği renkli diyapozitif kutuları ve ince beyaz saçlarıyla bilimsel konferans çevrelerinin vazgeçilmez bir siması haline gelmiştir. Ödüller kazanmaya ve başka mesleki onurlarla taltif edilmeye başlamış; Mandelbrot adı bilim çevreleri dışında da meşhur matematikçilerin adıyla birlikte anılır olmuştur. Bunun nedeni, kısmen, fraktal resimlerinin estetik cazibesiydi; kısmen, Mandelbrot'un dünyasını, mikro bilgisayarı olan binlerce kişinin hobi olarak kendi kendilerine araştırmaya başlayabilmeleriydi. Kısmen de, Mandelbrot'un öne çıkmayı bilmesiydi. Mandelbrot adı, Harvard'lı bilim tarihçisi I. Bernard Cohen tarafından derlenen küçük bir listede yer aldı.[30] Cohen yeni buluşların tarihine ilişkin kayıtları gözden geçirip kendi yaptığı çalışmaları "devrim" olarak niteleyen bilim adamlarını araştırmıştı. Hepsi hepsi on altı kişi bulup çıkarabilmişti. Robert Symmer, Benjamin Franklin'in çağdaşı olan bir İskoçyalı: Elektrik hakkındaki düşünceleri gerçekten devrim niteliğinde, fakat yanlıştı. Jean-Paul Marat, bugün sadece Fransız

İhtilaline yaptığı kanlı katkılarıyla hatırlanmaktadır. Von Liebig. Hamilton. Charles Darwin, tabii. Virchow. Cantor. Einstein. Minkowski. Von Laue. Alfred Wegener - kıtaların sürüklenmesi. Compton. Just. James Watson - DNA'nın yapısı. Ve Benoit Mandelbrot.

Bununla birlikte, sırfi matematikçilere göre, Mandelbrot, bilimin dışından gelmesine rağmen bilimdeki siyasete karşı olabildiğince hırsla mücadele açan bir kimsedir. En parlak başarılara imza attığı zamanlarda, tarihteki yerinden dolayı başının anormal bir biçimde döndüğünü düşünen bazı meslektaşları, ona karşı insafsızca saldırılar yöneltmişlerdir. Hak ettiği itibarın karşılığı olarak kendisine hürmette kusur edilmemesi için, Mandelbrot'un meslektaşlarına tahakküm ettiğini söylemişlerdir. Şurası muhakkak ki, mesleki dogmalara karşı çıktığı yıllarda, sadece bilimsel alanda başarılı olmak için çalışmakla kalmayıp bilimsel alanda başarıyı elde etmenin taktikleri konusundaki yeteneklerini değerlendirmeyi de bilmiştir. Zaman zaman fraktal geometriden mülhem fikirler kullanan makaleler çıktığında, yazarları aramış veya mektup yazmış ve kendisi ya da kitabı referans verilmediği için şikâyette bulunmuştur.

Mandelbrot'un hayranları, ortaya koyduğu eserin kabul görmesi için aşmak zorunda kaldığı güçlüklere bakıp, bencil davranışlarını affetmekte pek zorlanmamışlardır. Hayranlarından biri: "Tabii ki, *o da* biraz megalomanyaktır;[31] onda da o inanılmaz ego var, fakat yaptığı iş o kadar muhteşem ki. çoğu kimse karakterinin o tarafına aldırmıyor bile." demiştir. Bir başkasının sözleri de şöyledir: "Meslektaş olduğu matematikçilerden o kadar çekti ki, sırf ayakta kalabilmek için kendi egosunu şişirmeye yönelik bu stratejiyi geliştirmek zorunda kaldı. Şayet böyle yapmasaydı, doğruyu gördüğünden bu kadar emin olmasaydı asla bu başarıyı elde edemezdi."[32]

Bilimde muteber kişi olmak ya da başkasını muteber kişi yapmak konusu bir sabit fikir haline gelebilir. Mandelbrot ikisini de bol bol yapmıştır. Kitabı birinci şahsın ağırlığını hissettirmektedir: *Benim görüşüm . . . Ben tasarladım ve geliştirdim . . . ve uyguladım . . . Ben teyit ettim . . . Ben göste-*

riyorum . . . Ben şu ismi taktım . . . Yeni açılmış ya da yeni iskân edilmiş arazilere yaptığım seyahatlerde, sınır işaretlerine isim verme hakkını kullanmak üzere çoğunlukla ben davet ediliyordum.

Bilim adamlarının birçoğu bu üslup tarzından hazzetmediler. Hatta Mandelbrot'un, bazıları tamamen karanlıkta kalmış (ve muhaliflerinin kaydettiği gibi, hepsi de öbür dünyaya göç etmiş) olan seleflerinden referanslar verirken çok cömert davranmış olması bile, bunların kanaatlerini değiştirmeye yeterli olmadı. Mandelbrot'un ön plana çıkma gayreti içinde kendine göre bir yol tutturduğunu, adeta Papa'nın yaptığı gibi, kendisini merkez ilan edip etrafa ahkâm kestiğini düşündüler. Bununla kalmayıp Mandelbrot'la mücadeleye giriştiler. Bilim adamlarının *fraktal* kelimesini ağızlarına almaması artık mümkün değildi; ancak, Mandelbrot'un adını ağızlarına almamak için,[33] kesir boyuttan bahsederken *Hausdorff-Besicovitch boyutu* demeyi tercih ediyorlardı. Hatta, özellikle matematikçiler, Mandelbrot'un çeşitli bilim dalları arasında da bir oraya bir buraya atlamasına karşı tepki gösterip, iddialarını ve kuramlarını ortaya öylece attığını, bunları kanıtlamak için gerekli olan gerçek çalışmaların yapılmasını da başkalarına bıraktığını söylediler.

Bu da bilimde tartışma konusudur. Bir bilim adamı bir olgunun muhtemelen doğru olduğunu ortaya atar, bir diğeri de bunu ciddi delilleriyle kanıtlarsa bilimin ilerlemesine hangisi daha fazla katkıda bulunmuş olur? Bir kuramı oluştururken yapılan tahminler bilimsel bir buluş sayılır mı? Yoksa bununla sadece soğukkanlılıkla düşünülmüş bir iddia mı formüle edilmiş olur? Matematikçiler bu tür sorunlarla her zaman yüz yüze gelmişlerdir; ne var ki bilgisayarlar yepyeni bir rol oynamaya başladıktan sonra bu tartışma daha hararetlenmiştir. Deney yapmak için bilgisayar kullananlar laboratuvarda çalışan araştırıcılara daha çok benzemişlerdir, çünkü bu oyunun kuralları, matematik makalelerinde normal olarak yer alan alışılmış teorem-kanıt süreci olmadan da yeni buluşlar yapılmasına imkân vermektedir.

Mandelbrot'un kitabı hem çok geniş kapsamlı hem de matematik tarihine ait birçok küçük ayrıntılarla doluydu. Kaos ne tarafa yönelse Mandelbrot kendisinin oraya ilk giden kimse olduğunu iddia edip buna göre birtakım gerekçeler de anlatıyordu. Gösterdiği kaynakları okuyucularından birçoğunun hiç duymamış olmasının hatta yararsız görmesinin bile Mandelbrot'un gözünde hiçbir önemi yoktu. Sismolojiden fizyolojiye kadar, Mandelbrot'un gerçekte hayatında hiç etüd etmediği bilim alanlarının ilerlemesi için olağanüstü bir sezgiye sahip olduğunu kabul etsinler, yeterdi. Onun bu hali kimine anormal geliyor kimini de deli ediyordu. Hatta bir hayranının umutsuzca şu sözleri haykırdığı duyulmuştu: "Mandelbrot *herkesin* düşündüğü şeyleri onlar daha düşünmeden önce bilmiş olamaz."[34]

Bunun da pek önemi olmamıştır. Dehanın çehresinde her zaman Einstein'ın suratındaki gibi bir aziz ifadesi olmaz. Oysa Mandelbrot yıllarca, oyunu böyle oynamak mecburiyetinde olduğuna inanmıştır. Orijinal fikirleri, insanları yerinden hoplatmayacak ifadelere büründürüp açıklamak zorunda kalmıştır. Makalelerini yayınlamayı kabul etsinler diye, vizyon izlenimi veren görüşlerinin bulunduğu önsözleri metinden çıkarmak zorunda kalmıştır. 1975'te Fransızca olarak yayınlanan kitabının ilk versiyonunu kaleme aldığında, eserinde insanlarda şaşkınlık yaratacak hiçbir şey bulunmadığını ileri sürmek zorunluluğunu hissetmiştir. Bu yüzden, kitabının son şeklini açık açık "bir manifesto ve bir derleme" olarak yazmıştır. Bunu yaparken bilimin siyasetine girmiştir.

"Siyaset üslubumu öyle etkiledi ki, daha sonraları ben de bundan pişmanlık duymuşumdur. Ben şöyle diyordum: 'Bunun şöyle olması doğaldır. . . , İlginç olan bir gözlem de şudur . . . ' Aslında, şimdi, bunun doğallıkla hiçbir ilişkisi yoktur, ilginç denen gözlem de çok uzun süren araştırmaların, peşinde koşulan kanıtların ve kendi kendine karşı yapılan tenkitlerin sonucundan ibarettir. Bu üslubu kabul ettirebilmek için böylesine filozofça ve mesafeli br yaklaşım olması gerektiğine inanıyordum. İşin siyaseti de şuydu: herkesin bildiği şeylerden tamamen uzaklaşma ifade eden değişiklik-

ler önerdiğimi söylersem, okuyucuların ilgisinin tamamen kaybolması tehlikesi vardı.

Daha sonraları, bu ifadelerin bazılarını başkaları da benim yüzüme karşı kullanmaya başladılar, "Doğal olarak gözlenen şu husus . . .' Ben bunun böyle olacağını hiç ummamıştım."[35]

Mandelbrot geriye dönüp baktığında, çeşitli alanlardaki bilim adamlarının kendisinin bu yaklaşımına tepki gösterdiklerini ve bu tepkilerin, hep aynı öngörülebilir şekilde cereyan eden üzücü aşamalardan geçtiğini görmüştür. İlk aşama hemen hep şöyle olmuştur: Kimsiniz, bizim alanımızla niçin ilgileniyorsunuz? İkincisi: Yaptığınızın bizim yapmakta olduklarımızla ne ilişkisi var, yaptığınızı niçin bizim bildiklerimize dayanarak açıklamıyorsunuz? Üçüncüsü: Bunun standart matematik olduğundan emin misiniz? (Evet, eminim.) Öyleyse neden biz bunu bilmiyoruz? (Çünkü standarttır, ama çok karanlıkta kalmıştır.)

Matematik, bu yönüyle fizikten ve diğer uygulamalı bilimlerden farklıdır. Fizikte bir branşın modası geçtiğinde ya da verimsiz bir noktaya geldiğinde, bu konu artık tamamen geçmişe mal olmaya yüz tutar. Bundan böyle tarih olmuş bir merak konusudur. Modern bir bilimci için belki bir ilham kaynağı da olabilir; ancak, ölü fizik mutlaka geçerli bir sebepten dolayı ölmüştür. Buna karşılık, matematik öyle kanallar ve patikalarla doludur ki, belirli bir dönemde bunları izleyip hiçbir yere varamazken, bir bakarsınız, başka bir dönemde en önemli araştırma alanları haline dönüşüvermişlerdir. Saf haldeki bir düşüncenin potansiyel olarak uygulanabileceği alanları öngörmek kesinlikle mümkün değildir. Bundan dolayı, matematikçiler eserlerini estetik br biçimde değerlendirip tıpkı sanatçılar gibi zerafetin ve güzelliğin peşinde koşarlar. Mandelbrot da, işte bu yüzden, antikacılığını kullanarak, üzerlerindeki tozları silkelenmeye hazır durumda, çok güzel matematikler keşfetmiştir.

Böylece dördüncü aşama şu oluyordu: Matematiğin bu dallarındaki kimseler sizin çalışmalarınız hakkında ne düşünüyor? (Aldırmıyorlar bile, çünkü bunun matematiğe bir

katkısı yok. Gerçekte, kendi fikirlerinin tabiatı temsil etmesi onları hayrete düşürüyor.)

Sonuçta, *fraktal* kelimesi düzensiz ve parçalı, kırıklı ve kesikli şekilleri - kar tanelerinin billurumsu eğrilerinden galaksilerin kesintili tozlarına kadar düşünebileceğiniz bütün şekilleri - betimlemek, hesaplamak ve düşünmek için kullanılacak bir araç yerine geçen bir kelime olmuştur. Fraktal bir eğri bu gibi şekillerin korkunç görünümlü komplikasyonu içinde saklı duran düzenleyici bir yapıyı da içermektedir. Lise öğrencileri fraktalları kavrayıp onlarla oynayabilirler; fraktallar tıpkı Öklid elemanları gibi asıl elemanlardır. Fraktal resimler çizen basit bilgisayar programları kişisel bilgisayarıyla oynamaktan hoşlanan kişiler arasında elden ele dolaşmaktadır.

Mandelbrot'un gördüğü en büyük itibar, özellikle şirketlerin araştırma merkezlerinde petrol, kayalar ya da metaller konusunda çalışan uygulamalı araştırıcılar tarafından çalışmalarına coşkuyla ilgi gösterilmesi sayesinde olmuştur. Mesela, 1980'li yılların ortalarına kadar Exxon'un muazzam araştırma tesislerinde[96] çalışan çok sayıda bilim adamı fraktal problemler üzerinde çalışmışlardır. Fraktallar, General Electric'te, polimerlerle ilgili araştırmaların ve - bu çalışmalar gizlilik içinde yürütülmesine rağmen - nükleer reaktör güvenliğine ilişkin problemlerin temel düzenleyici ilkesi haline gelmiştir. Fraktalların en göz alıcı uygulaması, Hollywood'da filmler için hazırlanan özel efektlerle, yeryüzü ve uzayda inanılmaz derecede gerçekçi görünüşü haiz manzaraların yaratılması dolayısıyla görülmüştür.

Robert May ve James Yorke gibi araştırıcıların 1970'li yılların başlarında keşfettiği şekiller, düzenli davranışla kaotik davranış arasındaki karmaşık sınırları çerçevesinde, ancak büyük ve küçük ölçekler arasındaki ilişki itibariyle açıklanması mümkün olan şüphe edilemez düzenlilikler göstermiştir. Nonlineer dinamiğin çözümünde kilit rol oynayan yapıların da fraktal olduğu ortaya çıkmıştır. En kolay ve çabuk uygulamalar düzeyinde, fraktal geometri, fizikçiler, kimyacılar, sismologlar, metallürji uzmanları, ihtimal teori-

cileri ve fizyologlar tarafından alıp kullanılabilen bir araç seti olarak görülmüştür. Bu araştırıcılar Mandelbrot'un yeni geometrisinin tabiatın kendi geometrisi olduğuna hem kendileri inanmış hem de başkalarını buna ikna etmeye gayret göstermişlerdir.

Bahis konusu şekiller ortodoks matematik ve fizikte de yadsınamaz bir etki meydana getirmiş fakat, Mandelbrot bir türlü bu iki camianın saygısına tam anlamıyla mazhar olamamıştır. Ancak, hürmet etmeseler de Mandelbrot'u inkâr edememişlerdir. Bir matematikçi,[37] arkadaşlarına, bir gece uykusunda gördüğü bir kâbustan titreyerek uyandığını anlatmıştır. Rüyasında, matematikçi öldüğünü görmüş, birden Tanrının şaşmaz yanılmaz sesini duyuvermiş. "Sen de biliyorsun ki," demiş Tanrı, "bu Mandelbrot'ta hakikaten bir cevher var."

Kendi kendine benzerlik kavramı bizim kültürümüzde eski defterleri karıştırmak gibi bir şeydir. Batı düşünce tarihinin eski kollarından biri bu fikri baş tacı etmiştir. Leibniz, bir su damlasının içinde bütün bir evrenin bulunduğunu; bu evrenin de kendi içinde su damlacıkları ve onların da içinde başka yeni evrenler içerdiğini tasavvur etmiştir. Blake, "Dünyayı bir kum tanesinin içinde görmek," diye yazmış; bilim adamları da çoğunlukla bu gibi şeyler görmeye hevesli olmuşlardır. Spermler ilk olarak keşfedildiğinde, her birinin bir *homunculus*, küçücük fakat tam olarak şekillenmiş bir insan olduğu sanılmıştır.

Ne var ki, bilimsel bir ilke olarak kendi kendine benzerlik, geçerli bazı sebeplerden dolayı gözden düşmüştür. Olgular bunları doğrulamamıştır. Spermler sadece ölçeği küçültülmüş insanlar değildir; - aslında bundan çok daha ilginçtirler - ontogenetik gelişme süreci ise sadece ölçek büyütme konusu olmayıp bundan çok daha ilgi çekicidir. Kendi kendine benzerliği ilk başta düzenleyici bir ilke olarak gören yaklaşım, insanların ölçek konusundaki deneyimlerinin sınırlı olmasından kaynaklanmıştır. Çok büyüğü ve çok küçüğü, çok hızlıyı ve çok yavaşı, bildiğiniz bir şeyle karşılaştırmak dışında nasıl tahayyül edebilirsiniz?

Teleskoplar ve mikroskoplar insanın görüşünü genişletince bu efsane de çökmüştür. Bu araçlarla yapılan ilk keşifler, ölçekteki her değişikliğin yeni fenomenler ve yeni davranış biçimleri doğmasına yol açtığının anlaşılması şeklinde olmuştur. Modern parçacık fiziğinde bu süreç hiçbir zaman sona ermemiştir. Her yeni hızlandırıcı, enerjisi ve hızı arttıkça, bilimin görüş alanına daha küçük parçacıklar ve daha kısa zaman ölçekleri dahil etmekte, bilimsel alandaki her genişleme de yeni enformasyonlar getirdiği hissini vermektedir.

İlk bakışta, yeni ölçeklerde tutarlılık fikri birtakım enformasyon kayıplarına neden oluyor gibi görünmektedir. Bunun nedeni, kısmen, bilimde redüksiyonizm doğrultusunda paralel bir trendin mevcut bulunuşudur. Bilim adamları nesneleri parçalara ayırırlar ve her birine tek tek bakarlar. Atomaltı parçacıkların arasındaki etkileşimi incelemek isterlerse ikisini veya üçünü bir araya getirirler. Bu işlemde epeyi komplikasyon vardır. Halbuki, kendi kendine benzeme gücü karmaşıklığın çok daha yüksek düzeylerinde başlar. Bu, bütüne bakabilme sorunudur.

Mandelbrot boyutsuzlaşma konusunu geometride en kapsamlı şekilde kullanmış olmasına karşılık, 1960'lı ve 1970'li yıllarda bilim alanına geri dönen boyutsuzlaşma fikirleri, etkileri aynı anda birçok yerde hissedilen bir düşünce akımı haline gelmiştir. Kendi kendine benzerlik Edward Lorenz'in eserinin bünyesinde de saklı bir biçimde mevcuttur. Bunu kısmen şu yaklaşımında bulabiliyoruz: Lorenz, kendi kurduğu denklemler sistemi sayesinde yapılan haritalarda ince bir yapının varlığını sezmiş fakat, 1963'te mevcut olan bilgisayarlarla bu yapıyı göremediği için sezgiyle kavramıştır. Boyutsuzlaşma da, Mandelbrot'un çalışmalarından daha direkt bir şekilde fizikte kaos adıyla bilinen bilim dalının kurulmasına yol açan hareketin bir bölümü haline gelmiştir. Daha uzak bilim dallarında bile, bilim adamları boyutsuzluk hiyerarşilerini kullanan teoriler aracılığıyla düşünmeye başlamışlardır; mesela evrim biyolojisinde bir teorinin eksiksiz olabilmesi için genlerdeki, bireysel organizmalardaki, türlerdeki ve türlerin ailelerindeki gelişme paternlerinin hepsini

aynı anda tanıyabilen bir teori olması gerektiği açıkça anlaşılmıştır.

Bunun tam aksine, boyutsuzlaşma olgusunun tekrar makbul hale gelmesinin kaynağında, belki de, insanların bakış açısının genişlemesi vardır; oysa aynı türdeki bir genişleme geçmişte kendi kendine benzerlik konusundaki saf inançları yok etmiştir. Yirminci yüzyılın sonlarına geldiğimizde, hem anlaşılmayacak kadar küçük resimler hem de tasavvur edilemeyecek kadar büyük resimler, evvelce hiç düşünemeyeceğimiz yollardan herkesin günlük yaşantısına girmiş bulunmaktadır. Yaşadığımız kültür çerçevesinde hem galaksilerin hem de atomların fotoğraflarını görebiliyoruz. Artık hiç kimsenin, Leibniz gibi, mikroskopik ya da makroskopik ölçeklerde evrenin neye benzeyeceğini tahayyül etmesine gerek kalmamıştır - mikroskoplar ve teleskoplar bu resimleri günlük hayatımızın bir parçası haline getirmiştir. Zihnin deney sırasında analojiler bulup çıkarma konusundaki gayretkeşliği düşünülürse büyük ve küçük arasında yeni tür karşılaştırmaların yapmaktan kaçınılamayacak; üstelik bu mukayeselerin bazıları da çok yararlı olacaktır.

Fraktal geometrinin cazibesine kapılan bilim adamları, bu yeni matematiğin estetiği ile içinde yaşadığımız yüzyılın ikinci yarısında sanatta meydana gelen değişmeler arasında heyecan verici bir paralellik bulunduğunu sık sık hissetmişlerdir. İçlerinde duydukları coşkunun kaynağını çevrelerinde bulunan kültürden aldığını düşünmüşlerdir. Mandelbrot'a göre, Öklid duyarlılığının matematik dışındaki nümunesi Bauhaus* mimarisidir. Aynı şekilde bunun en iyi örneği Josef Albers'in renkli karelerinde görülen resim tarzı da olabilir: Minimal, düzenli, lineer, redüksiyonist, geometrik kareler. *Geometrik* deyince, bu kelimeden binlerce yıldan beri anlaşılan şeyi anlıyoruz. Geometrik denen binalar basit şekillerden, birkaç rakamla betimlenebilecek doğru hatlardan ve dairelerden meydana gelir. Geometrik mimari ve re-

*1919'da Alman mimar Walter Gropius'un Wiemar Güzel Sanatlar Akademisi ve Weimar Uygulamalı Güzel Sanatlar Okulunu birleştirerek kurduğu tasarım enstitüsü. (ç.n.)

sim modası gelip gitmiştir. Mimarlar artık New York'taki çok methedilen ve çok da taklit edilen Seagram Binası gibi blok halinde gökdelenleri inşa etmeye heves etmemektedirler. Mandelbrot'a ve onun izinden gidenlere göre bunun nedeni gayet açıktır. Basit şekiller beşeri değildir. Doğanın kendini organize ediş biçimiyle ya da insanın dünyayı algılayış biçimiyle aynı dalga boyunda değildir. İhtisasını süper iletkenlik konusunda yaptıktan sonra nonlineer bilime geçen Gert Eilenberger adlı bir Alman fizikçisinin: "Neden fırtınanın yatırdığı yapraksız bir ağacın bir kış akşamında gökte oluşan siluetini bu kadar güzel buluruz da çok amaçlı bir üniversite binasının aynı durumda oluşturduğu silueti, o binayı yapan mimarın bütün gayretlerine rağmen güzel bulmayız? Bana göre, bunun cevabını, biraz spekülasyon niteliğinde de olsa dinamik sistemlere ilişkin yeni bakış açımızda aramak gerekir. Bizim güzellik anlayışımız, düzen ve düzensizliğin ahenkli bir biçimde tertiplenmesinden esinlenmektedir ki, bunu doğal nesnelerde - bulutlarda, ağaçlarda, sıra dağlarda ya da kar tanelerinde - ortaya çıktığı şekliyle görüyoruz. Bütün bu nesnelerin şekilleri fiziksel biçim kalıplarına dökülmüş dinamik süreçlerdir; düzen ve düzensizliğin özel birtakım kombinasyonları da sadece bunlara özgüdür,"[38] sözlerinde ifadesini bulmaktadır:

Geometrik bir şeklin bir *ölçeği*, kendine özgü bir büyüklüğü vardır. Mandelbrot'a göre, insanın gözünü okşayan sanatta ölçek yoktur; yani, içerdiği önemli unsurlar her büyüklükte olabilir. Mandelbrot, Seagram Binasına karşı, Beaux-Arts'ın* heykelleri ve komik suratlı çörtenleri, köşe taşları ve söğe taşları, oymalı kıvrımlarla süslenmiş sütun başlıkları, üstü saraklı ve kenarları çentikli saçak silmeleri ile bezenmiş mimarisini örnek göstermiştir. Paris Opera'sı gibi bir Beaux-Arts şaheserinin ölçeği yoktur, çünkü bütün ölçekleri içermektedir. Binaya hangi uzaklıktan bakarsanız bakın mutlaka gözünüzün takılacağı bazı ayrıntılar bulursunuz. Yaklaştıkça bu ayrıntıların kompozisyonu değişir ve yapının yeni elemanları görünmeye başlar.

*Paris'teki Güzel Sanatlar Okulunun klasik mimari ve süsleme tarzı. (ç.n.)

Bir mimari eserinin ahenkli yapısını takdir etmek başka şeydir; doğadaki yaban hayatını zevkle seyretmek ise bambaşka bir şey. Estetik değerler açısından, fraktal geometrinin bu yeni matematiği sayesinde fiziksel bilimler, ehlileşmemiş, medenileşmemiş, evcilleşmemiş bir doğayı konu alan özel bir modern duygu ile aynı dalga boyunu paylaşmaktadır. Bir zamanlar toplumun tek derdi ve uğraşı, yağmur ormanlarını, çölleri, çalı kaplı bozkırları, tarıma elverişsiz çorak toprakları kendine tâbi kılmaktı. İnsanlar bitki örtüsüne estetik bir zevki tatmin etmek amacıyla baktıklarında hemen akıllarına bahçeler geliyordu. John Fowles on sekizinci yüzyıl İngiltere'sinden şöyle bahsediyordu: "O devirde, doğanın ilkel ya da düzenden çıkmış hallerine karşı hiçbir sempati beslenmezdi. Saldırgan bir yaban hayatı olarak görülen böyle bir doğaya, Adem'le Havva'nın işlediği günahı, insanın Cennet'ten ebediyen sürülüşünü anımsatan çirkin ve istilacı bir hatıra gözüyle bakılırdı . . . Kendi tabii bilimleri bile . . . yabani doğaya karşı temelde düşmanlık beslemiş ve onu sadece ehlileştirilmesi, sınıflandırılması, kullanılması, işletilmesi gereken bir şey olarak görmüştür."[39] Yirminci yüzyılın sonlarına gelindiğinde, artık kültür değişmişti; şimdi kültürle birlikte bilim de değişiyordu.

Böylece bilim nihayet, Cantor dizisinin ve Koch eğrisinin karanlıkta kalmış birtakım fantezi akrabalarına da işe yarayacakları bir yer buldu. İlk önce, matematikle fizik bilimleri arasında süregelen ve Newton'dan beri bilimin ana teması olan evliliğin, bu asrın başlarında sona ermesi üzerine görülen boşanma davasında bu şekilleri delil olarak kullanmanın mümkün olduğu düşünüldü. Cantor ve Koch gibi matematikçiler bu şekillerin orijinalliğine bayılmışlardı. Bunlar yüksek zekâları sayesinde tabiatı altedip sırlarını çaldıklarını sandılar - oysa gerçekte tabiatın yaratıcılığını kavrama düzeyine bile henüz erişebilmiş değillerdi. Bilimin en itibarlı akımı olma ünvanını elinde tutan fizik bile günlük yaşama sırtını dönmüştü. Ancak daha sonraları, Steve Smale matematikçileri dinamik sistemlere geri getirdiğinde, bir fizikçi şunu söyledi: "70 yıl önce biz bu bilim dalını gök bilimcilere

ve matematikçilere terketmiştik; şimdi onlar bu bilimi bize, yani fizikçilere çok daha iyi bir şekilde devrediyorlar; bundan ötürü onlara teşekkür borçluyuz."[40]

Oysa, Smale'e ve Mandelbrot'a rağmen, yeni bir kaos bilimini neticede gene fizikçiler kuracaktı. Bu bilimin artık vazgeçilmesi imkânsız olan dilini ve hayretler verici bir doğa resimleri kataloğunu Mandelbrot sağladı. Bizzat kendisinin de kabul ve ifade ettiği gibi, Mandelbrot'un programı *açıklayıcı* olmaktan ziyade *betimleyici* bir programdı. Doğadaki elemanların - deniz sahilleri, nehir ağları, ağaç kabuğu, galaksiler - fraktal boyutlarıyla birlikte listesini çıkarabilir; bilim adamları da bu sayıları öngörülerde bulunmak üzere kullanabilirlerdi. Oysa fizikçiler daha da fazlasını bilmek istiyorlardı.[41] Nedenini bilmek istiyorlardı. Doğada hâlâ ifşa edilmeyi bekleyen formlar vardı; bunlar gözle görülen formlar değil, hareket kılığına girmiş şekillerdi.

Garip Çekiciler

Büyük sarmallarda küçük sarmallar var
Büyüklerin hızından yararlanan,
Küçük sarmallarda daha da küçük sarmallar var
Viskoziteye kadar uzanan.

LEWIS F. RICHARDSON,

Türbülans soyu sopu bilinen bir problemdi. Büyük fizikçilerin[1] hepsi, resmi ya da gayrı resmi olarak, türbülans üzerine kafa yormuşlardır. Düzgün bir akış parçalanıp sarmallara ve burgaçlara dönüşür. Düzensiz şekiller akışkan cisimlerle katı cisimler arasındaki sınırı bozar. Enerji büyük ölçekli hareketlerden küçük ölçekli hareketlere doğru hızla akar. Niçin? Bu konudaki en parlak fikirler matematikçilerden gelmiştir; fizikçilerin birçoğuna göre türbülans o kadar tehlikeli bir konuydu ki, insan vaktini bununla israf etmemeliydi. Bilinmesi hemen hemen imkânsız gibi görünüyordu. Kuantum teoricisi Werner Heisenberg'le ilgili olarak anlatılan bir hikâye[2] vardır; buna göre, Heisenberg ölüm döşeğinde Tanrıya iki sual soracağını söylermiş: "neden relativite var ve neden türbülans var? Heisenberg dermiş ki, "eminim sadece ilk soruya cevap verebilecektir."

Teorik fizik türbülans karşısında adeta uzak durmayı tercih eder duruma gelmiştir. Gerçekten de, bilim yere bir çizgi çekmiş ve "Bu çizginin ötesine geçemeyiz," demiştir. Çizginin bilim tarafında kalan yanında, akışkanların düzenli davranış biçimlerine sahip oldukları yerde, yapılacak çok iş vardır. Neyse ki, akışı düzgün olan bir akışkan, içinde her biri bağımsız hareket etme yeteneğine sahip olan hemen he-

men sonsuz sayıda bağımsız moleküller varmış gibi davranmamaktadır. Bunun tersine, harekete birbirinin yanı başında başlayan akışkan elemanlar, tıpkı koşulmuş atlar gibi, birbirlerine yakın kalmak eğilimi gösterirler. Akışkan sakin halini muhafaza ettiği sürece, mühendislerin onu ölçmek için kullanabilecekleri etkin teknikler vardır. Başlangıcı on dokuzuncu yüzyıla, fiziğin en önde gelen problemlerinden birinin sıvıların ve gazların hareketlerini kavrama sorunu olduğu döneme kadar uzanan bir bilgi kümesinden yararlanırlar. Buna karşılık, modern çağa geldiğimizde, bu sorun artık gündemin ön sıralarını işgal etmekten çıkmıştır. Ciddi teoricilere göre, akışkanlar dinamiğinin, bir tanesi hariç, sakladığı hiçbir sırrı kalmamıştır; onun da ahrette bile çözüleceği yoktur. Bu konunun pratik yanı o kadar iyi kavranmıştır ki, tamamen teknisyenlere bırakılması bile mümkündür. Akışkanlar dinamiği gerçekten fiziğin bir kolu olmaktan artık çıkmıştır. Sadece mühendislik işidir. İstikbal vadeden genç fizikçiler kendilerine daha iyi konular bulmalıdırlar. Akışkanlar dinamikçilerinin yeri, genellikle üniversitelerin mühendislik bölümleridir. Türbülans konusunun incelenmesine duyulan ilginin ise her zaman uygulama ile ilgili yönü ön plâna çıkmıştır; bu ilgi de genellikle hep bir tek doğrultuda kalmıştır: türbülansı ortadan kaldırmak. Bazı uygulamalarda türbülans arzu edilen bir olaydır; mesela, jet motoru içindeki yanmanın verimli olabilmesi yakıtın hızla karışmasına bağlıdır. Ancak, uygulamaların birçoğunda türbülans felaket getirir. Kanat üzerinden türbülansla akan hava, kaldırma gücünü yok eder. Boru hattı içinde türbülansla akan petrol müthiş bir sürtünme yaratır. Hem devletler hem sanayiciler, akışkan cisimler içinde hareket eden uçak, türbinli motor, pervane, denizaltı gövdesi ve benzeri şekillerin dizaynı konusunda dünyalar kadar para akıtmaktadırlar. Araştırıcılar kanın, damarların ve kalp kapakçıklarının içindeki akışıyla ilgilenmek zorundadır. Patlamaların şekli ve evrimi araştırıcıların ilgi konularına girer. Anaforlar ve burgaçlar, alevler ve şok dalgaları da ilgi konularına girer. Teorik olarak, İkinci Dünya Savaşındaki atom bombası projesi nükleer

fiziği ilgilendiren bir problemdi. Gerçekte, nükleer fizik, o proje daha başlamadan önce büyük bölümü itibariyle çözümlenmişti; Los Alamos'ta toplanmış olan bilim adamlarını meşgul eden asıl konu akışkanlar dinamiğine ilişkin bir problemdi.

O halde, türbülans nedir? Türbülans, her ölçek düzeyinde ortaya çıkan bir düzensizliktir; büyük burgaçlar içindeki küçük burgaçlardır. Türbülans istikrarsızdır. İleri düzeyde sönüm özelliği vardır; bu da şu demektir: Türbülans enerjiyi akıtır ve sürtünme yaratır. Türbülans gelişigüzelleşmiş hareket demektir. Peki öyleyse düzgün bir akış nasıl değişip türbülans olmaktadır? Tamamen düzgün ve pürüzsüz bir borunuz ve tamamen düzenli bir su kaynağınız bulunduğunu, bunların titreşimlere karşı tamamen korunmuş olduğunu farzedin - böyle bir akış nasıl oluyor da *gelişigüzel* bir olgu yaratmaktadır?

Bütün kurallar sanki yıkılmış gibi görünmektedir. Akış düzgün ya da tabakalı olduğu zaman küçük pertürbasyonlar ortadan kalkar. Fakat türbülans eşiği aşıldığında, pertürbasyonlar felaket derecesinde artar. Bu eşik - bu geçiş hali - bilimde kritik bir esrar perdesine bürünmüştür. Bir derenin içindeki bir kayanın altında bulunan bir kanal büyüyerek dönen bir anafor haline gelmekte, bölünüp dağılmakta ve akış istikametinde dönmektedir. Sigara dumanı sigaranın bırakıldığı küllükten düzgünce yükselmekte, gittikçe hızlanarak kritik bir hızı aşmakta ve dağılarak şekli bozuk burgaçlar oluşturmaktadır. Türbülans eşiği laboratuvar deneylerinde görülüp ölçülebilen bir olaydır; rüzgâr tünelinde deneme çalışmaları yapılan yeni bir uçak kanadı ya da pervanesiyle ilgili olarak test edilebilir; ancak, doğası gereği ele avuca sığmaz. Kaldı ki, türbülans hakkında edinilen bilgiler hep araştırılan durumla sınırlı kalmış, evrensel bir nitelik kazanmamıştır. Bir Boeing 707 uçağının kanadı üzerinde deneme-yanılma yöntemiyle yapılan araştırmanın, bir F-16 savaş uçağının kanadı üzerinde deneme-yanılma yöntemiyle yapılan araştırmaya hiçbir faydası yoktur. Süper bilgisayarlar bile akışkanların düzensiz hareketi karşısında neredeyse çaresiz

kalmaktadır. Bir şey akışkan cismi çalkalamakta, tahrik etmektedir. Akışkan ağdalıdır - yapışkandır, böyle olduğu için enerji içerden dışarıya akar; akışkan cismi çalkalarken durursanız, frekansı düşük ya da dalga boyu büyük enerji ilave etmiş olursunuz; burada ilk göze çarpan şey büyük dalga boylarının çözülüp küçük dalga boyları halinde dağılmasıdır. Burgaçlar oluşur, onların da içinde daha küçük burgaçlar oluşur; her burgaç hem akışkan cismin enerjisini sönüme götürür hem de karakteristik bir ritim oluşturur. 1930'lu yıllarda A. N. Kolmogorov bu burgaç olayının nasıl gerçekleştiği hakkında bir fikir vermek üzere, matematiksel bir betimleme önermiştir. Bütün enerjinin, çağlayan gibi, gittikçe küçülen ölçeklerde, sonunda belirli bir sınıra ulaşıncaya kadar aşağıya döküldüğünü tahayyül etmiştir; bu sınırın oluştuğu yerde burgaçlar o kadar küçük hale gelmektedir ki, orada artık viskozitenin nispeten daha büyük etkileri devreye girmektedir.

Kolmogorov betimlemesine daha da berraklık kazandırmak amacıyla, burgaçların akışkanın bütün mekânını doldurması yüzünden akışkanın her yerde aynı hale geldiğini tahayyül etmiştir. Bu varsayımın,[3] yani homojenlik varsayımının doğru olmadığı ortaya çıkmıştır; Poincaré bile bunu daha kırk yıl önce biliyordu; çünkü bir nehrin pürüzlü yüzeyinde burgaçların her zaman, akışın düzgün olduğu bölgelerle karıştığını görmüştü. Girdaplaşmanın çerçevesi daralmıştır. Gerçekte enerji mekânın yanız bir kısmında sönmektedir. Türbülasyon halindeki bir burgaça daha yakından bakarsanız her ölçek düzeyinde, görüş alanınız içine yeni sükûnet bölgeleri girdiğini görürsünüz. Bu suretle, homojenlik varsayımı yerini intermitensi varsayımına bırakır. İntermitent resim belirli bir şekilde ideal hale getirildiğinde, ileri düzeyde fraktal bir görünüm alarak, büyükten küçüğe doğru hızla geçen ölçeklerde pürüzlü ve düzgün bölgeler birbiriyle karışık halde bulunur. İdeal hale getirilmiş intermitent resim ileri derecede fraktal bir görünüm alır; bunda, büyük ölçekten küçük ölçeğe doğru hızla değişen pürüzlülük ve düzgünlük bölgeleri birbiriyle karışmış durumdadır. Aslında bu resim de gerçeği tamamen yansıtan bir resim değildir.

Bununla yakından ilişkili olmakla birlikte tamamen ayrı bir sorun da türbülans başladığı zaman ne olduğudur. Bir akış düzgün hal ile türbülans arasındaki sınırı nasıl aşar? Türbülans tamamen gelişmeden önce hangi ara aşamalardan geçilir? Bu sorunlarla ilgili olarak ayakları yere biraz daha sağlam basan bir teori vardır. Bu ortodoks paradigma, Lev D. Landau'dan çıkmıştır; bir Rus bilim adamı Landau'nun akışkanlar dinamiği hakkında yazdığı kitap[4] hâlâ klasik bir eser olma niteliğini muhafaza etmektedir. Landau modeli, birbiriyle mücadele eden ritimlerin üst üste yığılmasından oluşmaktadır. Bu modele göre, bir sistemin içine daha fazla enerji dahil olduğunda, yeni frekanslar teker teker devreye girer; her biri bir öncekiyle uyumsuzdur, bunu tıpkı bir keman telinin, yay daha sert çekildiğinde titreşerek uyumsuz, ikinci bir sesle, sonra üçüncü, sonra dördüncü bir sesle tepki vermesi ve en sonunda sesin tamamen anlaşılmaz bir kakofoni haline gelmesine benzetebilirsiniz.

Her sıvı ya da gaz birbirinden ayrı moleküllerin bir araya toplanmasından meydana gelir; bu moleküller o kadar çoktur ki sonsuz olduğunu düşünmek mümkündür. Her parçanın bağımsız olarak hareket edebilmesi, akışkanın sonsuz kadar çok sayıda davranış biçimine, fizikçi diliyle sonsuz kadar çok "serbestlik derecesi"ne sahip olabileceğini; hareketi betimleyen denklemlerin de sonsuz kadar çok değişkenli olacağını ifade etmektedir. Ne var ki, her parçacık birbirinden bağımsız hareket etmez - hareketi komşularının hareketine çok bağımlıdır - üstelik, düzgün bir akışta serbestlik dereceleri de az olabilir. Karmaşıklık potansiyeli yüksek olan hareketler birbiriyle birleşik halde kalır. Birbirine yakın durumdaki moleküller gene birbirinin yakınında kalır ya da rüzgâr tüneli resimlerinde görüldüğü gibi, net çizgileri meydana getiren düzgün, lineer bir yolu takip ederek uzaklaşır. Sigara dumanı sütunundaki moleküllerin hepsi, bir süre, sanki bir tekmiş gibi yükselir.

Sonra karışıklık baş gösterir; yani birtakım düzeni bozuk esrarengiz hareketler ortaya çıkar. Zaman zaman bu hareketlere salınımlı, eğik varis, çapraz sargı, düğüm, zikzak gi-

bi isimler de verilmiştir.[5] Landau'ya göre, bu istikrarsız yeni hareketler, sadece birbirinin üstüne yığılmış ve üst üste binen hız ve büyüklüklere sahip olan ritimler yaratmıştır. Kavram olarak düşünüldüğünde, türbülans konusundaki bu ortodoks bakış açısı olgulara uymaktadır; teori matematiksel bakımdan faydasız olsa bile - doğrusu öyledir de - ziyanı yok, öyle olsun. Landau'nun paradigması insanın aczini kabul ettiğini gösteren, fakat aynı zamanda şerefini de kurtaran bir yaklaşımdır.

Bir borunun içinde ya da bir silindirin etrafında akan su hafif bir ıslık sesi çıkarır. Bu suyun basıncını zihninizde arttırın. İleri geri bir ritim başlar. Su tıpkı bir dalganın yapacağı gibi, borunun çeperine yavaşça vurur. Musluğu daha açın. Bir yerlerden çıkan ikinci bir frekans devreye girer; bu frekans birinci frekansla hiç senkronize değildir. Ritimler üst üste biner, birbiriyle tepişir, çarpışırlar. Daha şimdiden o kadar karmaşık bir hareket yaratmışlardır ki dalgaların birbirleriyle girişim halinde çeperlere şiddetle çarpışını izleyemezsiniz bile. Şimdi musluğu biraz daha açın. Üçüncü bir frekans devreye girecektir, sonra dördüncü bir frekans, beşinci, altıncı ve hepsi de öncekilerle tamamen uyumsuz olacaktır. Akış aşırı derecede karmaşık hale gelmiştir. Belki de türbülans budur. Fizikçiler bu modeli kabul ettiler. Ancak, enerjideki bir miktar artışın ne zaman yeni bir frekans yaratacağı ya da yeni frekansın ne olacağı nasıl öngörülebilecekti? Bu konuda hiçbirinin en ufak bir fikri yoktu. Deney sırasında esrarengiz bir biçimde ortaya çıkan bu frekansları daha önce hiç kimse görmemişti, çünkü türbülans eşiği için Landau'nun teorisini şimdiye kadar sınayan hiç kimse olmamıştı.

Teorik fizikçiler deneyleri zihinlerinde yaparlar. Uygulamalı fizikçiler ise ellerini de kullanır. Teorik fizikçiler düşünür, Uygulamalı fizikçiler zanaatçıdır. Teorik fizikçilerin suç ortağına ihtiyacı yoktur. Uygulamalı fizikçilerin lisansüstü öğrencilerini bir araya toplaması, teknisyenlerin gönlünü alması, laboratuvar asistanlarına iltifatlar etmesi gerekir. Teorik fizikçiler her türlü gürültüden, titreşimden, kirden uzak sade, basit bir yerde faaliyet gösterir. Uygulamalı fi-

zikçiler heykeltraşın çamurla yaptığı gibi, maddeyle mücadele ederek, yoğurarak, şekillendirerek onunla bir yakınlık tesis eder. Teorik fizikçiler, tıpkı safdil bir Romeo'nun idealindeki Jülyet'i yaratması gibi, kendi arkadaşlarını yaratır. Uygulamalı fizikçilerin sevgilileri ise terler, şikâyet eder ve etrafı kokutur.

Teorik fizikçilerle Uygulamalı fizikçilerin birbirine ihtiyacı vardır, ancak birbirlerine ihtiyaç duymakla birlikte, eski zamanlarda her bilim adamının hem teorik fizikçi hem de uygulamalı fizikçi olduğu günlerden beri, aralarındaki ilişkilere birtakım eşitsizlikler girmesine göz yummuşlardır. En iyi uygulamalı fizikçilerin arasında hâlâ teorik fizikçilerden bazılarının bulunduğu görülmektedir, halbuki bunun tersi de doğrudur, denemez. Neticede, prestij bakımından terazinin kefesi teorik fizikçilerden yana ağır basmaktadır. Özellikle yüksek enerji fiziğinde, şan ve şeref teorik fizikçilerin olmuş, buna karşılık uygulamalı fizikçilere de, pahalı ve karmaşık teçhizatla çalışan ileri derecede uzmanlaşmış teknisyenler olmak kalmıştır. İkinci Dünya Savaşından bu yana geçen yıllarda, fiziğin tarifi yapılırken, temel parçacıkları inceleyen bilim dalı olarak tanımlanmaya başladığından, parçacık hızlandırıcılarıyla yapılan deneyler, üzerinde en çok yayın yapılan deney konuları olmuştur. Dönüş, simetri, renk, tat - en göz kamaştırıcı soyutlamalardır. Kendisi bilim adamı olmadığı halde bilimde olup biteni izlemeyi seven birçok kimse, tıpkı bir kısım fizikçiler gibi, fizik deyince atom parçacıklarının incelenmesini anlamaktadır. Daha küçük parçacıkları kısa zaman ölçeklerinde incelemek demek, daha yüksek düzeylerde enerji demektir. Bu yüzden, başarılı deneyler için gerekli olan ekipman yıllar geçtikçe artmış, deneylerin niteliği de parçacık fiziği alanında tamamen farklı hale gelmiştir. Bu alana rağbet gösteren de çok olduğundan, büyük deneyler ekip çalışmasını teşvik etmiştir. *Physical Review Letters* dergisinde, parçacık fiziği hakkındaki makalelerden başka bir şey bulup okumak zordur; derginin normal bir sayısında bu konuda makale yazanların isim listesi neredeyse bir sayfanın dörtte birini kaplamaktadır.

Bununla birlikte, deneycilerden bazıları tek başlarına ya da iki kişi olarak çalışmayı tercih etmiş, daha somut konular üzerinde çalışmışlardır. Hidrodinamik gibi konular eski itibarını kaybederken, katı hal fiziğinin itibarı artarak, sonuçta "yoğun ortamlar fiziği" (madde fiziği) gibi, daha kapsamlı bir isim kazanmasını sağlayacak kadar alanını genişletmiştir. Yoğun madde fiziğindeki mekanizma gayet basittir. Teorik fizikçi ile uygulamalı fizikçi arasındaki uçurum biraz daha kapanmıştır. Teorik fizikçiler züppeliklerinden, uygulamalı fizikçiler de güvensizliklerinden biraz fedakârlıkta bulunmuşlardır.

Buna rağmen, yaklaşımları birbirinden farklı olmuştur. Konferans veren bir uygulamalı fizikçinin sözünü keserek şöyle sormak, bir teorik fizikçiden rahatlıkla beklenebilecek bir davranıştır: ""Bu söylediklerinizi için daha fazla veri toplanmış olsa daha inandırıcı olmaz mıydı? Bu grafik biraz akıl karıştırmıyor mu? Şu sütundaki sayıların daha yüksek değerleri ifade edebilecek şekilde artması gerekmez mi?"

Buna karşılık, Harry Swinney'in tepkisi, boyunu (1m. 65 kadardı) iyice yükselterek, memleketi olan Louisiana sevimliliği ve New York'ta edindiği çabuk öfkelenme alışkanlığı ile, "Evet, doğru"[6] demekti. "Şayet elinizde sonsuz miktarda gürültüsüz veri varsa." Sonra tartışmaya son vermek istercesine tekrar kara tahtasına dönüp, "Gerçekte," derdi, "tabii her zaman elinizde az miktarda gürültülü veri olacaktır."

Swinney deneylerini maddelerle yapıyordu. Hayatının dönüm noktası, Johns Hopkins Üniversitesinde doktora çalışmasını yaparken gerçekleşmişti. Parçacık fiziği karşısında duyduğu heyecanı saklaması mümkün değildi. Günün birinde, görüşleri birçok kimseye ilham kaynağı olan Murray Gell-Mann, Enstitüde bir seminere gelmiş; kendisini dinleyen Swinney de anlattıklarına kendini tamamen kaptırmıştı. Ancak, doktora öğrencilerinin neler yaptığına baktığında ya bilgisayar programı yazdıklarını ya da kıvılcım odası lehimlediklerini gördü. Bunun üzerine, faz geçişleri - katı halde iken sıvı hal olarak, mıknatıssız iken mıknatıs olarak, iletken iken süper iletken olarak değişmeler - üzerinde çalış-

maya başlayan eski bir fizikçiyle konuşmaya başladı. Aradan çok geçmemişti ki, Swinney'e boş bir oda verildi - sandık odası kadar bir şeydi, ama sadece ona aitti. Eline geçirdiği bir ekipman kataloğundan siparişler vermeye başladı. Kısa bir süre sonra bir masası, bir lazeri, bazı soğutma cihazları ve birkaç sondası vardı. Karbon diyoksitin buhar halinden sıvı hale geçtiği kritik noktanın civarında ısıyı ne kadar iletiğini ölçmek için bir cihazın tasarımını yaptı. Çoğu kimse termal iletkenliğin hafifçe değişeceğini sanmaktaydı. Swinney bunun 1000 faktörü kadar değiştiğini buldu. Harika bir şeydi bu: Tek başına küçücük bir odada, başka kimsenin bilmediği bir şeyi keşfetmişti. Kritik noktanın yakınlarında, bir buhardan, herhangi bir buhardan (ışınların yumuşak bir şekilde saçılması opal taşındaki beyaz pırıltıyı verdiği için) "opalesans" denen sanki başka bir dünyadan gelmişe benzeyen ışığı görüyordu.

Çoğunlukla kaosta da olduğu gibi, faz geçişleri makro düzeyde öyle birtakım davranış biçimleri içerir ki, mikro düzeydeki ayrıntılara bakarak bunları öngörmek pek kolay olmaz. Katı bir cisim ısıtıldığında eklenen enerjinin etkisiyle molekülleri titreşir. Moleküller aralarındaki bağlara rağmen dışarıya doğru itişirler ve maddeyi genleşmek zorunda bırakırlar. Isı arttıkça genleşme de artar. Ancak, belirli bir sıcaklık ve basınca erişince, değişme birdenbire ani ve süreksiz hale döner. İp önceleri uzamaktayken şimdi kopar. Kristal şekil eriyerek moleküller birbirinden uzağa kayar. Katı cisimlerin hiçbir niteliğinden çıkarılması mümkün olmayan yasalara, akışkan cisimlerin yasalarına riayet ederler. Atomun ortalama enerjisi hemen hemen değişmemiş, fakat malzeme - şimdi bir sıvı, bir mıknatıs ya da bir süper iletken haline gelmiş - yepyeni bir âleme dahil olmuştur.

Günther Ahlers, New Jersey'de AT&T Bell Laboratuvarlarında çalışırken, sıvı helyumda süper akışkan geçişi denen bu olayı inceledi; bunda sıcaklık azaldıkça, malzeme hissedilir bir viskozite ya da sürtünme olmaksızın adeta akan sihirli bir sıvı haline dönüyordu. Başka bazı kimseler süper iletkenliği incelediler. Swinney maddenin sıvı ve buhar arasın-

da değişmeye geçtiği kritik noktayı inceledi. Faz geçişlerini inceleyen genç kuşaktan, Swinney, Ahlers, Pierre Bergé, Jerry Gollub, Marzio Giglio gibi uygulamacı fizikçiler, hatta Amerika Birleşik Devletleri, Fransa ve İtalya'daki daha başkaları 1970'li yılların ortalarına kadar yeni yeni problemler aradılar. Postacının mektup dağıttığı mahalledeki bütün ev ve sokak aralarını gayet iyi tanıması gibi, bu fizikçiler de asıl hallerini değiştiren maddelerin verdiği özel işaretleri tanıyıp öğrendiler. Maddenin, üzerinde dengede durduğu o sınırı incelemiş bulunuyorlardı.

Faz geçişi araştırmalarındaki ilerlemeler analojiyi basamak olarak kullanarak gerçekleşmiştir: Mıknatıssızlıktan mıknatısa faz geçişi tıpkı sıvıdan buhara faz geçişi gibi olmuştur. Akışkandan süper akışkana faz geçişi de tıpkı iletkenden süper iletkene faz geçişi gibi olmuştur. Bir deneydeki matematik daha başka birçok deneye uygulanmıştır. 1970'li yıllara gelinceye kadar problem büyük ölçüde çözülmüş bulunmaktaydı. Bu konuda çözülemeden kalan bir mesele şuydu: bu teorinin kapsamını nereye kadar genişletmek mümkün olabilecekti? Dünyadaki hangi değişmelerin faz geçişleri olduğu, yakından incelendiği zaman görülecekti?

Faz geçişi tekniklerini akışkan cisimlerin içindeki akışlara uygulama fikri ne en orijinal ne de en apaçık bir düşünceden kaynaklanıyordu. En orijinal fikir değildi, çünkü hidrodinamiğin yirminci yüzyılın başlarındaki büyük öncüleri olan Reynolds ve Rayleigh ile onları takip edenler, dikkatle denetlenen bir akışkan deneyinin hareket miktarında bir değişiklik - matematikçilerin ifadesiyle bir dallanma - meydana getirdiğini zaten fark etmiş bulunuyorlardı. Mesela, bir akışkan cismin hücresinde alttan ısıtılan sıvı birdenbire hareketsizlikten harekete geçer. Bu dallanmanın fiziksel karakterinin, tıpkı faz geçişi başlığı altında ele alınan maddelerdeki değişmelere benzediği varsayımı fizikçilere çok cazip geliyordu.

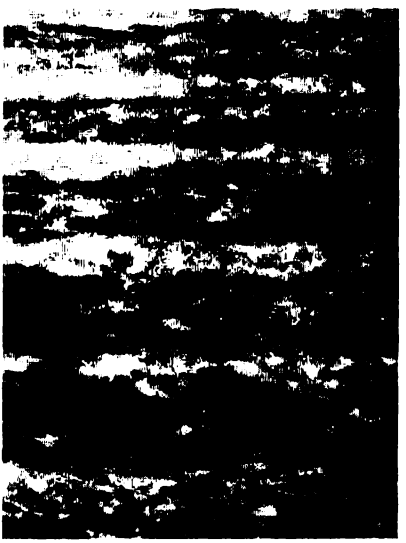
En açıkça bilinen fikir de değildi, çünkü faz geçişlerinden farklı olarak, akışkanlardaki bu dallanmalar maddenin özünde hiçbir değişiklik meydana getirmez. Tam aksine, ye-

ni bir unsur ilave ederler: hareket. Durgun bir sıvı akan bir sıvı haline gelir. Böyle bir değişikliğin matematiği ne diye yoğunlaşan buharın matematiğine uysun ki?

Swinney 1973 yılında[7] New York City College'de ders veriyordu. Yarı ciddi yarı çocuksu bir karaktere sahip olan Harvard mezunu Jerry Gollub ise Haverford'da ders veriyordu. Philadelphia yakınlarında kırların ortasındaki bir güzel sanatlar fakültesi olan Haverford, aslında bir fizikçi için cazip bir yer sayılmazdı. Ne laboratuvardaki çalışmalarda yardım edecek ne de bu işlerin en önemli özelliği olan usta-çırak ilişkisinin çırak kısmını tamamlayacak olan doktora öğrencileri vardı. Buna rağmen, Gollub lisans düzeyinde ders vermekten çok hoşlandı ve Fakültede deneysel çalışmalarının kalitesi ile çok iyi tanınan bir merkezde fizik bölümünü kurmaya başladı. O sene öğretim üyelerine tanınan bir sömestrlik izin hakkını kullanarak New York'a Swinney'le birlikte çalışmaya geldi.

Faz geçişleri ile akışkanların istikrarsızlığı arasındaki analojiyi akıllarından çıkarmayan bu iki bilim adamı iki dikey silindir arasındaki bulunan klasik sıvı sistemini incelemeye karar verdiler. Silindirin biri diğerinin içinde dönüyor, dönerken etrafındaki sıvıyı da beraberinde çekiyordu. Bu sistemde sıvının akışı iki yüzey arasında sıkışmış durumdaydı. Böylece, sıvının fışkırması ya da açık bir yüzeydeki dalgalar gibi yapabileceği muhtemel hareketler mekân içinde sınırlanmıştı. Dönen silindirler, Couette-Taylor adıyla bilinen bir tür akışı meydana getiriyordu. Bu deneyde değişmeyen şey, içteki silindirin, daha uygun olduğu için, sabit bir kabuğun içinde dönmesidir. Dönüş hareketi başlayıp hızlandıkça, ilk istikrarsızlık ortaya çıkar: Sıvı, bir benzin istasyonunda üst üste istiflenmiş iç lastikleri andıran bir görünüm alarak hoş bir şekil oluşturur. Silindirin çevresinde birbirinin üstüne yerleştirilmiş donatlar şeklinde şeritler görünür. Akışkanın içine işaret olarak bırakılan bir küçük parçacık donatların etrafında sadece doğu batı istikametinde değil yukarı ve içeriye, aşağı ve dışarıya doğru da döner. Bu kadarı daha önceden de bilinmektedir. G. I. Taylor da bunu görmüş ve 1923'te ölçmüştür.





DÖNEN SİLİNDİRLERİN ARASINDAKİ AKIŞ. İki silindir arasındaki akışın meydana getirdiği şekil sayesinde, Harry Swinney ve Jerry Gollub türbülans eşiğine bakmak fırsatını yakaladılar. Dönüş hızı arttıkça akışın yapısı daha karmaşık hale gelmektedir. Başlangıçta suyun akışının oluşturduğu karakteristik şekil, üst üste istiflenmiş donatları andırmaktadır. Sonra donatlar çırpıntılanmaya başlar. Fizikçiler, her yeni istikrarsızlık hali belirdiğinde, suyun hızındaki değişmeleri ölçmek için bir lazer kullanmışlardır.

Couette akışını incelemek amacıyla, Swinney ve Gollub masa üstüne yerleştirilen, otuz santimetre yüksekliğinde ve beş santimetre çapında, ince bir tenis topu kutusu büyüklüğünde bir cihaz imal ettiler; bu cihaz, dışta duracak bir cam silindirdi. Bunun içinde kolayca kayarak dönen çelikten yapılmış bir ikinci silindir vardı; ancak, iki silindirin arasında su için ancak üç milimetrelik bir yer bırakılmıştı. Daha sonraki aylar boyunca Swinney ve Gollub'u görmeye gelen beklenmedik ziyaretçiler arasındaki tanınmış simalardan Freeman Dyson bu deney için, "Tam bir eksik gedik tıkama işiydi"[8] demişti, "Bu iki beyefendi küçücük bir laboratuvarda beş parasız oturmuşlar, harika güzel bir deney yapıyorlardı. Türbülans hakkındaki esas kantitatif çalışma onların yaptığı bu araştırmayla başladı."

İki bilgin ise yaptıklarının geçerli bir bilimsel çalışma olarak kendilerine belirli bir itibar sağlamasının mümkün olduğunu, ancak sonradan nasıl olsa unutulup gideceğini düşünmekteydiler. Swinney ve Gollub'un asıl niyeti, Landau'nun türbülans eşiğine ilişkin düşüncesini doğrulamaktı. Deneyciler bunu gerçekleştirebilecekleri konusunda hiç şüphe etmiyorlardı. Akışkanlar dinamikçilerinin Landau'nun modeline inandıklarını biliyorlardı. Fizikçi olarak onlar da bu tabloyu beğeniyorlardı, çünkü faz geçişlerinin gösterdiği genel tabloya uyuyordu; bizzat Landau da faz geçişlerini incelemek için en uygun olabilecek çerçeveyi daha baştan belirlemişti; bunun temelindeki düşüncesi, bu gibi fenomenlerin, bazı özel maddelerdeki farkları etkisiz kılan düzenlilikleri sayesinde evrensel yasalara uyabileceği idi. Harry Swinney karbon diyoksitteki sıvı-buhar kritik noktasını araştırırken, Landau'dan aldığı ilhamla, bulgularını ksenondaki sıvı-buhar kritik noktasına da aktarabileceği varsayımıyla yola çıkmıştı; gerçekten de bu inancı doğrulanmıştı. O halde türbülansı, hareket eden bir akışkanın içinde birbiriyle çatışma halindeki ritimlerin düzgün bir şekilde yığılması olarak görmemek için ne sebep vardı ki?

Swinney ve Gollub hareket eden akışkanların karmakarışıklığına karşı mücadele vermek üzere, faz geçişlerini yıllar-

ca, en nazik şartlarda bile inceleyerek geliştirdikleri gayet düzgün bir deney teknikleri yöntemi hazırladılar. Laboratuvarda, akışkanlar dinamikçilerinin hayallerinden bile geçmesi mümkün olmayan çalışma stilleri geliştirip ölçme ekipmanları sağladılar. Dönüş halindeki akıntıları sonde etmek için lazer ışığı kullandılar. Suyun içinde parıldayan bir ışın kırılmaya ya da dağılmaya sebep olacağından bunu ancak *lazer doppler interferometri* denen bir tekniği kullanarak ölçmek mümkün olabilecekti. Bütün verilerin bir bilgisayarda depolanması ve işlenmesi de mümkündü; 1975'te laboratuvarlarda yapılan deneylerde bilgisayarlar henüz masaların üstünde görülen cihazlar arasında değildi.

Landau, akış arttıkça yeni frekansların teker teker belireceğini söylemişti. Swinney de bunu hatırlatıyordu: "Bizler bunu okumuştuk; eh, öyleyse, dedik, biz de bu frekansların devreye girdiği yerlerdeki geçişlere bakarız. Baktık da; gerçekten geçiş tam tanımlandığı şekliyle gerçekleşmekteydi. Geçiş sırasındaki bütün ihtimalleri gözden geçirdik, silindirin dönüş hızını arttırdık, azalttık. Tanıma tamamen uyuyordu."[9]

Swinney ve Gollub deneyin sonuç raporunu yazmaya başladıklarında,[10] fizik alanı ile akışkanlar dinamiği alanı arasında, bilim sosyolojisiyle ilgili bir sınıra gelip dayandılar. Bu sınırın çok belirgin bazı özellikleri vardı. En başta, National Science Foundation'da (Ulusal Bilim Kurumu) bu deneye sağlanacak mali yardımın hangi daireden çıkacağını bu sınır belirliyordu. 1980'li yıllara gelindiğinde, Couette-Taylor deneyi gene fizik bilimine dahil edilmişti; ne var ki, 1973'te düpedüz akışkanlar dinamiği alanına dahil sayılmaktaydı; akışkanlar dinamiğine alışık olan insanların da, City College'in o küçük laboratuvarından gelen ilk rakamların temiz olduğu hususunda şüpheleri mevcuttu. Akışkanlar dinamikçileri onlara hiç inanmamıştı. Fizikte faz geçişi için titiz ve hassas bir tarzda deney yapılması konusunda alışkanlıkları yoktu. Kaldı ki, akışkanlar dinamiği perspektifi bakımından, böyle bir deneyin teorik bakımdan herhangi bir yararı olacağına da inanmıyorlardı. Swinney ve Gollub, National Science Foundation'a (Ulusal Bilim Kurumu) finans-

man için tekrar müracaat ettiklerinde reddedildiler. Bazı hakemler, Swinney ve Gollub tarafından bildirilen sonuçları itibar edilir düzeyde görmemiş, bazıları da yaptıklarında yeni bir şey olmadığını söylemişti.

Fakat onlar deneyi hiç durdurmadılar. Swinney, ""Geçiş oluyordu, tanıma da tam uyuyordu,"[11] dedi. "O bakımdan muhteşemdi. Sonra da bir sonrakini aramak için devam ettik."

İşte orada, Landau dizisinde, zincirin sırada çıkması beklenen halkası koptu. Deney teoriyi doğrulamakta âciz kalıyordu.[12] Bir sonraki geçişte, akış tamamiyle karmakarışık bir hale atlayıverdi; bu halde hiçbir devreyi bir diğerinden ayırt etmek mümkün değildi. Ne yeni frekans vardı, ne de tedricen oluşan bir karmaşıklık. "Bulduğumuz tek şey, deneyin kaotik bir hale döndüğü oldu." Birkaç ay sonra, laboratuvarlarının kapısından içeri, zayıf, çok da sevimli bir Belçikalı giriyordu.

David Ruelle zaman zaman iki çeşit fizikçi olduğunu,[13] birinin, büyürken radyoları parça parça ayırıp dağıtan (bu katı halden önceki dönemi ifade etmektedir; o zamanlar hâlâ kablolara ve turuncu renkli ışık veren vakumlu tüplere bakıp elektronların akışı hakkında bir şeyler tahayyül edebilirdiniz) diğerinin ise kimya setleriyle oynayanlar olduğunu söylerdi. Ruelle kimya setleriyle oynayanlardandı; belki de Amerika'da sonradan anlaşıldığı anlamdaki setler değil de, memleketi olan kuzey Belçika'da mahallenin eczanesinde mutlu bir gülücükle hazırlanıp sonra da bizzat Ruelle tarafından karıştırılan, çalkalanan, ısıtılan, kristalleştirilen ve bazen de patlatılan patlayıcı ya da zehirli kimyasallar maddelerle. Bir jimnastik öğretmeni ile bir dilbilimi öğretim üyesinin oğlu olarak 1935'te Ghent'te dünyaya gelen Ruelle, akademik kariyerini bilimin soyut düzeylerinde yapmasına rağmen, kriptogam fungoid mantarların ya da sürprizlerini güherçilenin, kükürtün ve odun kömürünün içine saklayan doğanın tehlike yaratıcı yönüne karşı hep merak duyuyordu.

Ruelle, kaos araştırmalarındaki en kalıcı katkısını matematiksel fizik alanında yaptı. 1970'e doğru, Paris'in banliyösünde, Princeton'daki Institute for Advanced Study (Yüksek

Araştırmalar Enstitüsü) model alınarak kurulmuş Institut des Hautes Études Scientifiques (Yüksek Bilimsel İncelemeler Enstitüsü) adlı Enstitüde çalışmaya başlamıştı. Daha önceleri âdet haline getirdiği bir huyunu ömür boyu terketmemiştir: Enstitüden ve ailesinden ayrılıp tek başına, arkasına taktığı bir sırt çantasıyla İzlanda'nın ya da Meksika kırlarının ıssız yabani ortamında haftalarca yürümeyi severdi. Bazen hiç kimseyle karşılaşmadığı olurdu. İnsanlara rastladığı ve onların bütün misafirperverlikleriyle kendisine yaptıkları ikramları kabul ettiği zaman, mesela içinde hiç yağ (hayvani ya da bitkisel) bulunmayan bir mısır ekmeğini yerken, sanki dünyanın iki bin yıl önceki halinde yaşıyormuş gibi bir duyguya kapılırdı. Enstitüye döndüğünde, yüzü biraz daha çökmüş, yuvarlak alnının ve sivri çenesinin üstünde cildi biraz daha gerilmiş olarak tekrar bilimsel yaşantısına başlardı. Ruelle, Steve Smale'i, at nalı haritasından ve dinamik sistemlerdeki kaos ihtimallerinden bahsederken dinlemişti. Akışkanlarda türbülans olayı ve klasik Landau resmi hakkında da kafasını biraz çalıştırmıştı. Bu düşüncelerin birbiriyle ilişkili - ve birbirine zıt olduğundan şüphe ediyordu.

Ruelle'in daha önceleri akışkanlardaki akış konusunda hiçbir deneyimi olmamasına rağmen, kendisinden önce bu konudaki çalışmaları başarısız kalmış selefleri gibi, o da cesaretini kaybetmedi. "Yeni buluşlar hep o alanda uzman olmayan kişilere nasip olmuştur,"[14] diyordu. "Türbülansla ilgili olarak doğal ve derin bir teori yoktur. Türbülans hakkında sorabileceğiniz bütün sorular ancak genel mahiyette sorular olabilir, bu yüzden de uzman olmayan kimseler de bunları kavrayabilir." Türbülansın nasıl olup da sırrını analizlere açmadığını görmek kolaydı. Akışkanlardaki akışa ilişkin denklemler nonlineer kısmi diferansiyel denklemlerdir; bazı özel durumlar hariç çözülmelerine imkân yoktur. Oysa Ruelle, Landau modeline karşı, içindeki uzay resimlerini, sıkıştırılacak, gerilip uzatılacak ve katlanıp at nalı gibi şekiller verilecek katlanabilir bir malzeme olarak değerlendiren soyut bir alternatif yaklaşım geliştirdi ve bunu Smale'in diliyle ifade etti. Çalıştığı enstitüde, Floris Takens adlı Hollandalı

bir misafir matematikçi ile ortaklaşa bir makale yazdı ve bunu 1971'de yayınladı.[15] Makalenin üslubundan matematikçi yaklaşımıyla kaleme alınmış olduğunu anlamamak mümkün değildi - fizikçiler, dikkat! - yani paragraflar ya *Tanım ya Önerme* ya da *Çözüm* kelimeleriyle başlar ve söylenen şeyin hemen arkasından: " . . . . *olsun*" ifadesi gelirdi."

"Önerme (5.2). *Xμ, H ile gösterilen bir Hilbert uzayında Ck-vektör alanlarından oluşan tek parametrelik bir aile olsun . . . .*"

Oysa makalenin adı konunun gerçek dünya ile bağlantısını ortaya koyuyordu: "Türbülansın Doğası Üzerine," Landau'nun meşhur "Türbülans Problemi Üzerine" adlı eseri olan düşünülerek konmuş bir isimdi. Ruelle ve Takens'in argümanlarının amaçları açıkça matematiğin sınırlarını aşmaktaydı; geleneksel türbülans eşiği görüşüne karşı alternatif bir model oluşturmak amacının güdüldüğü açıkça görülüyordu. Ruelle ve Takens, birbirinden bağımsız olarak üst üste binen sonsuz sayıda harekete yol açan frekansları birbiri üstüne yığmak yerine, türbülansın bütün karmaşıklığının sadece bağımsız üç hareketten çıktığı önermesini ortaya attılar. Matematik açısından bakılırsa, geliştirdikleri mantığın bir bölümü için, ya karanlık ya yanlış ya da oradan buradan derleme veya hem karanlık hem yanlış hem de derleme denmesi normaldi - ancak, bu kanaatler on beş yıl sonra gene değişecekti.[16]

Buna rağmen, makalenin dokusunu meydana getiren fikirler, yorumlar, notlar ve fiziği bir araya getiren örgü sayesinde ortaya kalıcı bir hediye çıkmıştı. Hepsinden daha fazla cazip gelen şey ise yazarların bir garip çekici dedikleri şeydi. Ruelle daha sonraları, bu cümlenin psikoanaliz yaklaşımı açısından "telkin edici"[17] bir cümle olduğunu düşündü. Kaosun incelenmesi sürecinde bu deyimin öyle bir statüsü oldu ki, Ruelle ve Takens kaosla ilgili kelimelerin seçiminin şeref ve itibarını paylaşmak konusunda birbirleriyle, adeta nezaket sınırlarının zorlandığı bir zeminde çekişip durdular. Aslında gerçeği hiçbiri tam olarak hatırlamıyordu; fakat adı Takens olan iri yapılı, sağlıklı benizli, biraz yabani tavırlı

bir İskandinavyalı, "Tanrıya bu kahrolasıca evreni yaratıp yaratmadığını hiç sordunuz mu? . . . Ben hiçbir şey hatırlamıyorum. . . . Ben genellikle yarattığım şeyleri hatırlamam,"[18] derken, makalenin kıdemli yazarı olan Ruelle de yumuşak bir ifadeyle, "Takens'in IHES'i* ziyaret edeceği tutmuştu. Her yiğidin ayrı bir yoğurt yiyişi vardır. Bazı insanlar makalelerini tek başlarına yazarak işin bütün şerefi kendilerine kalsın isterler."[19] demişti.

Garip çekici, modern bilimin en güçlü buluşlarından biri olan faz uzayında yaşamaktadır. Faz uzayı sayıları resimlere dönüştürür, hareket halindeki mekanik ya da akışkan bir sistemden bütün temel bilgileri, en küçük kırıntısına kadar çekip çıkartır ve kendi imkânlarının hepsini esnek bir yol haritası çizip bunun üstünde gösterir. Fizikçiler daha önceleri de "çekiciler"in iki basit çeşidi üzerinde çalışmışlardır: sabit noktalar ve limit devreler; bunlar, düzenli bir hale erişen ya da kendini durmadan tekrarlayan bir davranış biçimi gösterirler.

Faz uzayında, dinamik bir sisteme ilişkin bütün bilgilerin zaman içinde belirli bir andaki durumu tek bir noktaya indirgenmektedir. Bu nokta, tam o andaki dinamik sistemin kendisidir. Buna karşılık, bu anı takip eden bir sonraki anda sistem, çok hafif de olsa değişecek ve nokta yerinden oynayacaktır. Sistemin zamanının tarihini, yerinden oynayan ve zamanın geçişi sırasında faz uzayında kendi yörüngesini çizen nokta ile göstermek mümkün olacaktır.

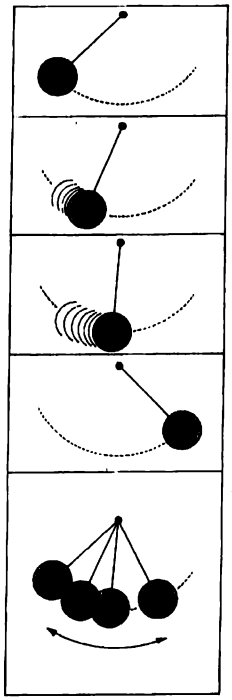
Komplike bir sisteme ilişkin bütün bilgiler tek bir noktada nasıl depo edilebilir? Sistemde sadece iki değişken varsa bunun cevabı gayet kolaydır. Liselerde okutulan Descartes geometrisine bakmak yeter: Bir değişken yatay eksende; diğer değişken de dikey eksende yer alır. Eğer bu sistem sallanma halindeki sürtünmesiz bir sarkaç ise değişkenlerin biri pozisyonu, diğeri de hızı temsil eder; iki değişken durmadan değişerek noktalardan oluşan bir hat çizer, bu da kendi etrafında durmadan dönerek kendini tekrarlayan bir

*__Institut des Hautes Ètudes Scientifiques__ (Yüksek Bilimsel İncelemeler Enstitüsü). (ç.n.)

sarmal meydana getirir. Aynı sistem, daha yüksek bir enerji düzeyinde - gittikçe daha hızlı sallanarak - faz uzayında tıpkı birinci sarmala benzeyen fakat ondan daha geniş olan bir sarmal meydana getirir.

Bu tabloya sürtünme biçiminde katacağımız biraz gerçeklik resmi değiştirecektir. Sürtünmeye tabi olan bir sarkacın akıbetini bilmemiz için hareket denklemlerini kullanmamıza gerek yoktur. Sonuçta, her yörüngenin sonu aynı yer, yani merkez olacaktır: pozisyon 0, hız 0. Bu merkezi sabit nokta yörüngeleri "çeker". Yörüngeler sonsuza kadar çevrede sarmallaşacağına, içeriye doğru dönen bir helezon yaparlar. Sürtünme sistemin enerjisini söndürür; faz uzayında sönüm, merkeze doğru, yüksek enerjinin dış kesimlerinden alçak enerjinin iç kesimlerine doğru bir çekiş biçiminde kendini gösterir. Çekici - en basit türden olanı - tıpkı lastik bir yaprağa sarılmış sivri uçlu bir mıknatıs gibidir.

Çeşitli durumları düşünürken bunlara uzaydaki noktalar olarak bakmanın bir avantajı da, değişimi gözlemeyi kolaylaştırmasıdır. Değişkenleri durmadan yukarı aşağı değişen bir sistem, odanın içinde dönüp dolaşan bir sinek gibi, hareket eden bir nokta haline gelir. Değişkenlerin değerlerinden bazıları belirli kombinasyonlarda bir araya gelemiyorsa bilim adamı sadece odanın o kısmının sınırların dışında kaldığını varsayacaktır. Demek ki sinek o kısma hiç gitmemektedir. Sistem periyodik bir davranış biçimi içindeyse, yani önce gidip sonra tekrar aynı duruma geliyorsa sinek sarmal bir hareket yaparak faz uzayında aynı pozisyondan tekrar tekrar geçiyor demektir. Nasıl ki, enfraruj ışınlarla alınmış manzara fotoğrafları tamamen insanın algılama yeteneğinin ötesinde olan şekilleri ve ayrıntıları ortaya çıkarabiliyorsa fizik sistemlerin bu faz uzayı portreleri de, başka türlü görülmesine imkân olmayan hareket şekillerini ortaya koymuştur. Bilim adamları bir faz portresine baktıkları zaman o sistemin nasıl olduğunu düşünmek için hayalgücünü kullanabilirler. Falan sarmal filan periyodikliği ifade eder. Falan bükülme filan değişimi ifade eder. Falan içsiz boşluk filan fiziksel imkânsızlığı ifade eder.

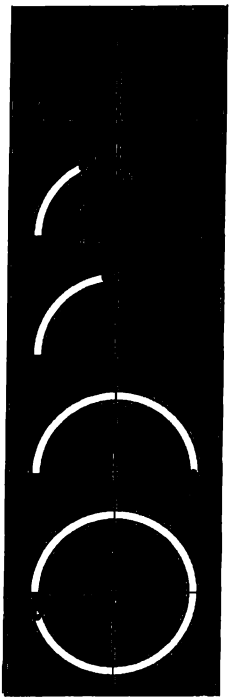


Sarkaç sallanmaya başladığı sırada hız 0'a eşittir. Pozisyon negatif bir sayı olarak, merkezin sol tarafındadır.

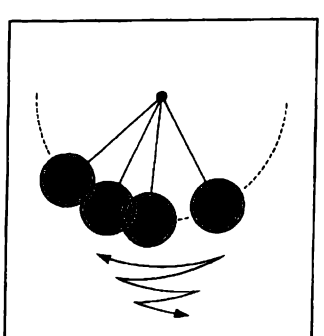
İki sayı iki boyutlu durum uzayında tek bir noktanın yerini belirler

Sarkacın pozisyonu sıfırdan geçerken hız azami değerine ulaşır.

Hız tekrar sıfıra düşer, sonra da hareketin sol tarafa yönelişini göstermek için negatif bir değer alır.

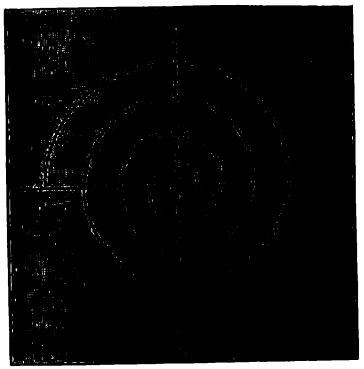


BİR SARKACI GÖRMENİN BAŞKA BİR YÖNTEMİ. Faz uzayındaki bir nokta (sağda) dinamik bir sistemin herhangi bir andaki haline ilişkin bütün bilgileri içermektedir (solda). Basit bir sarkaçta, iki değeri - hızı ve pozisyonu - biliyorsanız başka hiçbir bilgiye ihtiyacınız yoktur.



İki nokta dinamik bir sistemin uzun süreli ve devamlı davranış biçimini göz önüne getirmeye imkân sağlayan bir güzergâh çizmektedir. Tekrarlanan bir sarmal kendini düzenli aralıklarla ebediyen tekrarlayan bir sistemi gösterir.

Tekrarlanan davranış biçimi sarkaçlı bir saatte olduğu gibi, istikrarlı ise sistem küçük pertürbasyonlara uğradıktan sonra bu yörüngeye geri döner. Faz uzayında, yörüngenin yakınından geçen güzergâhlar yörüngeye doğru çekilirler; yörüngenin kendisi de bir çekicidir.



Bir çekici tek bir noktadan ibaret olabilir. Enerjisini düzenli bir şekilde sürtünmeyle kaybeden bir sarkaçta, bütün güzergâhlar, kararlı bir hali gösteren bir nokta istikametinde içeri doğru sarmallaşırlar; bu şekildeki kararlı hal, hiçbir hareketin olmadığı kararlı haldir.

Faz uzayı portrelerinin iki boyutta bile sakladığı sürprizler bitmez; hatta bunların bazılarını masanızın üstündeki bir bilgisayar bile kolayca çözümleyip denklemleri hareket eden renkli güzergâhlar haline dönüştürebilir. Bazı fizikçiler arkadaşlarına göstermek için bunları filme almış, video kasete çekmiş; Kaliforniya'daki bazı matematikçiler de[20] içinde çizgi filme benzeyen yeşil, mavi ve kırmızı renkli resimler bulunan kitaplar yayınlamışlardı; bunların kimi meslektaşları da biraz da alay olsun diye, bu kitaplara "kaos resimli romanları" adını taktılar. İki boyut, fizikçilerin incelemesi gereken sistem türlerini açıklamaya yeterli değildi. Gösterecekleri değişken sayısının ikiden fazla olması gerekiyordu ki bu da boyut sayısının daha fazla olması demekti. Bir dinamik sistemin bağımsız olarak hareket edebilen her parçası başka bir değişken, başka bir serbestlik derecesidir. Her serbestlik derecesinin faz uzayında ayrı bir boyuta sahip olması gerekir; yoksa tek bir noktanın sadece sistemin hangi durumda olduğunu belirlemek için yeterli miktarda bilgi içermesi mümkün olamaz. Robert May'ın incelediği basit denklemler tek boyutluydu - sıcaklığı veya nüfusu temsil eden tek bir sayı olması yetiyordu; üstelik bu sayı bir noktanın tek boyutlu bir hat üzerinde bulunduğu pozisyonu tanımlıyordu. Lorenz'in basite indirgenmiş akışkan konveksiyonu sistemi üç boyutluydu; bunun nedeni akışkanın üç boyutta hareket etmesi değil, sadece akışka-

nın herhangi bir andaki durumunu saptayabilmek için birbirinden ayrı üç sayının gerekli olmasıydı.

Dört, beş ya da daha çok boyutlu uzaylar en yetenekli bir topologun bile hayalinde bir modeli canlandırma yeteneğinin limitlerini zorlamaktadır. Ancak, karmaşık sistemlerde birçok bağımsız değişken vardır. Matematikçiler, içinde sonsuz sayılacak kadar çok serbestlik derecesi bulunan bulunan sistemler için - zapturapta alınamayan doğanın, kendisini çalkantılı bir çağlayanın türbülansında ya da bir beynin faaliyetlerinin öngörülemezliğinde açıklaması gibi - sonsuz sayıda boyuttan oluşan bir faz uzayı gerekli olduğu gerçeğini kabul etmek zorunda kalmışlardır. İyi de, böyle bir şeyle başa çıkmaya kimin gücü yeterdi ki? Bu gaddar ve ele avuca gelmez bir ejderhaydı; buna aynı zamanda Landau'nun türbülans modeli de denebilirdi: Sonsuz sayıda titreşim, sonsuz sayıda serbestlik derecesi, sonsuz sayıda boyut.

Doğayı açıklamakta bu kadar aciz kalan bir modeli hiçbir fizikçi alıp da baş tacı etmez. Dünyanın en hızlı süper bilgisayarları, akışkan cisimlerin hareketlerine ilişkin nonlineer denklemleri kullanarak, bir santimetre küplük türbülanslı bir akışın miktarını bile birkaç saniyeden fazla doğru olarak izleyemez. Bunun kabahati şüphesiz Landau'nun değil, doğanındı; fakat öyle bile olsa Landau'nun tablosu eşyanın tabiatına aykırıydı. Sorun hakkında hiçbir bilgisi olmasa bile, fizikçi bu alanda henüz bulunmamış bir ilke kalmış olmasından şüphe etmeliydi. Kuantum fiziğinin büyük teoricisi Richard P. Feynman bu duyguyu şöyle ifade etmiştir: "Doğa yasalarına göre, bugün anladığımız kadarıyla, bir olayın cereyan ettiği yer istediği kadar küçük, cereyan ettiği zaman dilimi de istediği kadar kısa olsun, bir bilgisayarın o olayın ne olduğunu anlaması için sonsuz sayıda mantık işlemi yapmasının gerekli olması benim kafamı her zaman kurcalayan bir sorun olmuştur. Küçücük bir uzay/zaman parçasının ne yapacağını anlamak için ne diye böylesine sonsuz miktarda mantığa ihtiyaç olması gerekiyor ki?"[21]

Kaosu araştırmaya başlayan birçok kimse gibi, David Ruelle de, türbülans halindeki akış içindeki gözle görülen şekille-

rin - kendi üzerine sarılan akıntı hatları, sarmal burgaçlar, gözün önünde yükselen ve tekrar kaybolan sarmallar - daha henüz keşfedilmemiş bulunan yasalar tarafından izah edilen şekilleri yansıttığından şüphelenmiştir.[22] Zihninden, türbülans halindeki bir akışta enerjinin sönümünün faz uzayını bir tür kasılmaya, bir çekiciye doğru çekilmeye götürdüğü konusu geçmekteydi. Hiç kuşkusuz, bu çekici sabit bir nokta olmayacaktı, çünkü akış hiçbir zaman istirahat durumuna gelmiyordu. Sisteme hem bol miktarda enerji akıyor hem de dışarıya enerji kaçıyordu. Başka hangi tür bir çekici olabilirdi? Geleneksel inanışa göre, yalnız bir tek türden bir başka çekici vardır; bu da periyodik bir çekici ya da limit devredir - yakınındaki diğer bütün yörüngeleri çeken bir yörünge. Bir sarkaç bir yay sayesinde enerji kazanıyor ve bu enerjiyi sürtünme dolayısıyla kaybediyorsa - yani, sarkacın hem hareketi sürdürülüyor hem de genliği küçülüyorsa - faz uzayında çizeceği en istikrarlı yörüngenin manzarası, dededen kalma bir saatin düzenli sallanma hareketini gösteren kapalı bir sarmal görünümünde olacaktır. Sarkacın başlangıç noktası neresi olursa olsun, sonunda gelip gene aynı bu yörüngeye oturacaktır. Yoksa oturmayacak mıdır? Bazı başlangıç durumu şartları için - enerjinin en düşük olduğu şartlarda - sarkaç gene nihai pozisyon olarak duruş durumunu hedef alarak salınım yapacaktır; öyle ki, sistemin gerçekte iki çekicisi vardır, biri kapalı bir sarmal, diğeri ise sabit bir noktadır. Her çekicinin kendi "havzası" vardır; tıpkı birbirine yakın akan iki nehrin sularının geçtiği kendi ayrı bölgeleri olması gibi.

Kısa vâdede, faz uzayındaki her nokta dinamik sistemin muhtemel bir davranış biçimine karşılık gelmektedir. Uzun vâdede ise, bizzat çekicilerin kendileri dışında mümkün olabilen başka hiçbir davranış biçimi yoktur. Diğer hareket türleri gelip geçici niteliktedir. Çekiciler, tanımları icabı, önemli bir istikrar özelliğine sahiptir - gerçek bir sistemde, hareketli parçalar gerçek dünyanın gürültüsünden kaynaklanan darbelere ve titreşimlere tabi oldukları için, hareket, sonunda çekiciye doğru yönelme eğilimindedir. Bir darbe, belirli bir yörüngeyi kısa bir süreyle saptırabilir, fakat bundan

kaynaklanan gelip geçici hareketler kısa zamanda yok olur. Sarkaçlı bir saatin üstüne bir kedi bile gelip çıksa, bir saatlik süreyi altmış iki dakikaya çıkarmaz. Akışkanlardaki türbülans daha farklı bir türden davranış biçimleridir; tek bir ritmi gerçekleştirmek için diğer ritimleri asla dışlamaz. Türbülansın iyi bilinen özelliklerinden biri aynı anda mevcut olan gerçekleşmesi muhtemel çevrimlerin çok geniş bir yelpazeye yayılmış olmalarıdır. Türbülans aynı gürültü gibidir; ya da statiktir. Böyle bir şey nasıl olur da basit, determinist bir denklemler sisteminden çıkabilir?

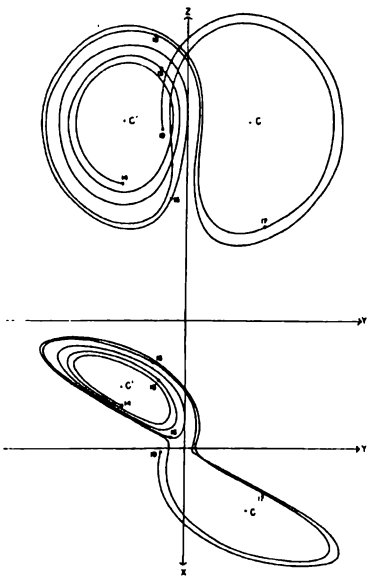
Ruelle ve Takens başka türden bir çekicinin de bahis konusu bu özelliklere aynen sahip olup olmadığı konusunu merak ettiler. Çekicilerin doğru teşhis edilen bu özellikleri nelerdi? İstikrarlı, yani gürültülü bir dünyada, dinamik bir sistemin erişeceği nihai durumu ifade ediyordu. Düşük boyutlu, yani faz uzayında, sadece birkaç derecelik bir serbestlik çerçevesinde, dikdörtgen ya da kutu biçimi (iki ya da üç boyut) çizebilen bir yörünge idi. Periyodik değildi, yani kendini hiç tekrarlamıyor ve dededen kalma bir saatin ritim düzenine hiçbir zaman girmiyordu. Geometri bakımından sorun bir bilmeceden farksızdı: Sınırlı bir uzayda nasıl bir yörünge çizmeliydi ki, kendini hiçbir zaman tekrarlamasın ve kendi kendisiyle kesişmesin - çünkü bir sistem daha önce geçtiği herhangi bir duruma dönerse bundan sonra tekrar aynı yolu takip etmek zorundaydı. Ritmin her düzeyini oluşturmak gerekirse yörüngenin sonsuz bir alanda, sonsuz uzunlukta bir doğru şeklinde olması gerekiyordu. Başka bir deyişle, fraktal olması - iyi de, bu kelime daha henüz icat edilmemişti - olması gerekecekti.

Matematiksel mantık açısından, Ruelle ve Takens böyle bir şeyin var olması gerektiğini öne sürdüler. Bunu hiç görmemişler, hiçbirinin resmini de çizmemişlerdi. Fakat iddia ediyorlardı ya, bu da yeterliydi. Daha sonraları, Ruelle, Varşova'daki Uluslararası Matematikçiler Kongresinde, genel kurula hitaben yaptığı bir konuşmada, eski günlerden bahsetmenin rahatlığı içinde şunları söylemiştir: "Bilim çevrelerinin önerimize karşı tepkisi gayet soğuk olmuştu. Özellikle, sürekli spektrumun bir kaç serbestlik derecesi ile birlikte

değerlendirilebileceği düşüncesi birçok fizikçinin gözünde deli zırvasından başka bir şey değildi."[23] Ne var ki, 1971'de yayınlanan bu makalenin önemini kavrayan ve açtığı yolda çalışmalarını ilerleten kimseler de gene - o bir avuç - fizikçiler olmuştur.

Gerçekte, 1971'de bilim literatüründe, Ruelle ve Takens'in canlı canlı yakalayıp getirmeye çalıştıkları hayali bile imkânsız olan o yaratığın resmi olarak küçük bir çizgi daha önceden de bulunuyordu. Edward Lorenz o resmi,[24] 1963'te yayınladığı determinist kaos konulu makalesinin ekinde vermişti: Sağ tarafta biri diğerinin içindeki iki eğriden, sol tarafta da beş eğriden oluşan bir resim. Sırf bu yedi sarmalı meydana getiren noktaları belirlemek için Lorenz'in bilgisayarda birbiri arkasına 500 işlem yapması gerekmişti. Faz uzayındaki bu güzergâh boyunca, sarmallar üzerinde hareket eden bir nokta tıpkı Lorenz'in konveksiyona ilişkin üç denklemle modellediği gibi, bir akışkanın kaotik dönüşünü andırmaktaydı. Sistemde üç bağımsız değişken olduğu için, bu çekici üç boyutlu bir faz uzayında yer almaktaydı. Lorenz bunun küçük bir parçasını vermişti, fakat çizdiğinden daha fazlasını görebiliyordu: bu, sonsuz bir maharetle örülmüş bir çift kelebek kanadına benzeyen bir nevi çifte helezon idi. Lorenz'in sisteminde ısı arttığında akışkanı bir yöne doğru ittiği zaman, izlediği güzergâh sağ kanatta kalıyordu; sargı hareketi durup tersine döndüğü zaman da güzergâh karşı tarafa geçip diğer kanatta salınıyordu.

Çekici istikrarlıydı, düşük boyutluydu ve periyodik değildi. Kendi kendisiyle asla kesişmiyordu; çünkü kesiştiği takdirde, daha önce geçtiği bir noktadan tekrar geçmiş olacaktı ki, ondan sonra hareketin kendi kendini tekrarlamaya başlayıp periyodik bir sarmal haline gelmesi gerekecekti. Bu da hiçbir zaman olmamıştı - zaten çekicinin güzelliği de buradan geliyordu. Bu sarmal ve helezonlar sonsuz bir derinliğe sahipti, asla birbirine kavuşmuyor, asla birbiriyle çakışmıyordu. Oysa aynı sonlu mekânda kalıyor, bir kutunun dışına çıkmıyorlardı. Bu nasıl oluyordu? Sonsuz sayıda yollar nasıl oluyor da sonlu bir mekânda bulunabiliyordu?



İLK GARİP ÇEKİCİ. 1963 yılında, Edward Lorenz, üzerinde çalıştığı basit denklemler sisteminin sadece ilk birkaç halkasını hesaplarıyla çıkarabilmişti. Fakat, Lorenz, görülmeyecek kadar küçük ölçeklerde, iki sarmal kanadın birinden diğerine geçişinin olağanüstü bir yapıya sahip bulunması gerektiğini görebiliyordu.

Mandelbrot'un fraktal resimleri bilim piyasasını kaplamadan bir dönem kadar önce, böyle bir şekli inşa etmenin detaylarını hayal etmek bile hemen hemen imkânsızdı; kaldı ki Lorenz de, kendi betimleme girişiminde "gözle görülür bir çelişki" bulunduğunu kabul etmiş ve, "Her biri bir helezon içeren ve iki güzergâhının birleşmesi de mümkün olmayan iki yüzeyin birbiriyle kaynaşmasını bağdaştırmak çok güçtür,"[25] diye yazmıştı. Ancak, gördüğü bir yanıt vardı ki, bu çözüm bilgisayarının gücü çerçevesinde yapabildiği birkaç hesap işleminde ortaya çıkmayacak kadar hassastı. Lorenz, helezonların birleşir gibi göründüğü yerde, yüzeylerin bölünmek zorunda kalarak tıpkı milföy hamuruyla yapılmış bir pasta gibi ayrı ayrı katmanlar oluşturduğunu fark etmişti. "Her yüzeyin aslında bir çift yüzey olduğunu görüyoruz, böylece birbiriyle birleşir gibi göründükleri yerde aslında dört yüzey olmaktadır. Bu süreci başka bir devrede sürdürünce, aslında sekiz yüzey olduğunu, ve bunun böyle devam ettiğini görüyoruz; nihayet, yüzey sayısının sonsuz bir karmaşıklıkta oldu-

ğunu, her yüzeyin de birbiriyle birleşen yüzeylerden birine ya da ötekine aşırı derecede yakın olduğu sonucuna varıyoruz." 1963 yılında meteorologların böyle bir spekülasyona neden yüz vermediklerini, on yıl kadar sonra da Ruelle'in, Lorenz'in çalışmalarını öğrendiğinde neden şaşkınlık ve heyecan duyduğunu anlamakta zorluk çekmiyoruz. Ruelle, daha sonraki yıllarda Lorenz'i bir kez ziyarete gitti[26] ve bilimdeki ortak ilgi alanları üzerinde daha uzun uzadıya konuşamadıkları için Lorenz'in yanından biraz da hayal kırıklığıyla ayrıldı. Utangaç Lorenz'in düzenlediği programa uyup, eşleriyle birlikte bir sanat müzesine gitmişlerdi.

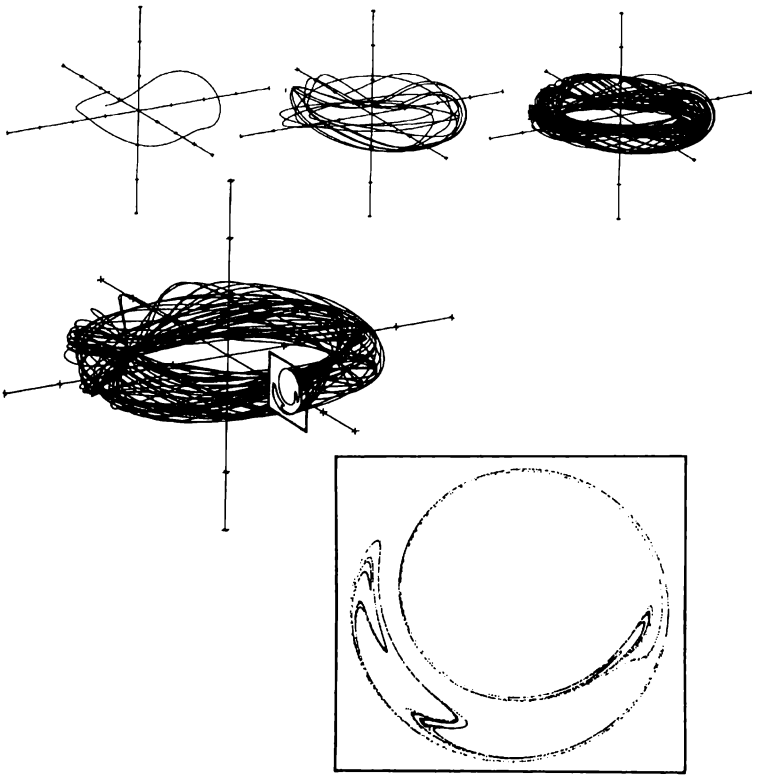
Ruelle ve Takens'in ortaya attığı bu fikirlerin gelişmesi iki yönde olmuştur. Birincisi, garip çekicileri gözünde canlandırmak için teorik düzeyde sürdürülen bir mücadeledir. Lorenz çekicisinin tipik özellikleri var mıydı? Başka şekiller çıkması imkânı var mıydı? İkinci istikamette ise, aslında matematikle hiç ilgisi olmayan bir inanış çerçevesinde, garip çekicilerin doğadaki kaosa uygulanabileceği düşüncesini onaylama ya da reddetmeye yönelik bir dizi deneysel çalışmalar yapılmaktaydı.

Japonya'da mekanik yayların davranış biçimini - onlardan çok daha hızlı olarak - taklit eden elektrik devrelerini inceleyen Yoshisuke Ueda harika güzellikte bir dizi garip çekici keşfetti. (Bilim çevreleri Ruelle'i nasıl soğuk karşıladıysa aynen ona da Doğu usulü bir soğuk karşılama programı layık görmüştür: Sizin elde ettiğiniz sonuç hemen hemen periyodik bir salınımdan başka bir şey değildir. Sakın ola ki, cisimlerin düzenli haline ilişkin yeni bir şey bulduğunuzu sanıp böbürlenmeyesiniz."[27]) Almanya'da, kendisi hekim olduğu halde mesleğini icra etmeyen Otto Rösler, kaos alanına kimya ve teorik biyolojiden geçerek gelmiş ve garip çekicileri felsefeye özgü nesneler olarak görmek gibi acayip bir yaklaşımla işe koyulup, bunların matematiksel niteliğini arka planda bırakmıştı. Rössler'in adı ortasından katlanmış bulunan kurdele şeklindeki çok basit ve özel bir çekiciyle birlikte anılır oldu; çizilmesi kolay olduğu için bu çekici çok inceleme konusu yapıldı. Rössler daha yüksek boyutlardaki çekicileri gözünde can-

landırıyordu: "Bir sosisin içindeki bir sosisin içindeki bir sosisin içindeki bir sosis,"[28] diyordu, "o sosisi dışarı çıkarın, katlayın, sıkıştırın, sonra gerisingeri yerine koyun." Gerçekten de, garip çekicileri inşa etmek için kullanacağınız anahtar, uzayı katlamak ve sıkıştırmaktan geçmektedir; bu işlem belki, gerçek sistemleri meydana getiren dinamiğin çözümünü de açan anahtardır. Rössler bu şekillerin dünyada kendi kendini organize eden bir ilkeyi içerdiğini düşünüyordu. Hava alanındaki rüzgâr tulumu gibi bir şey tahayyül etti; "ucunda bir delik bulunan açık bir boru tahayyül edin; rüzgârın bu borunun içine zorla girdiğini düşünün," dedi. "Bundan sonra rüzgâr borunun içinde hapsolmaktadır. Enerji, aslında amacı bu olmamakla birlikte, orta çağların tarihindeki şeytan gibi, verimli bir sonuç meydana getirmektedir. Buradaki prensip tabiatın kendi arzu ve iradesi dışında bir şey yapması ve kendi üzerine sarılarak güzelliği yaratmış olmasıdır."

Garip çekicilerin resmini çizmek pek öyle yabana atılacak bir iş değildi. Yörüngelerin hepsinde ortak olan özellik, izledikleri yolları, gittikçe daha komplike bir halde üç ya da daha fazla boyut içinde sarmaları ve böylece uzay içinde meydana getirdikleri karalamaya benzeyen şeklin iç yapısını dışardan görmenin imkânsız olduğu idi. Bu üç boyutlu yumakları düz resimler haline dönüştürmek için, bilim adamları önce projeksiyon tekniğini kullandılar; bu teknikte, çizilen resim çekicinin bir yüzey üzerine düşen gölgesini temsil ediyordu. Ne var ki, daha komplike nitelikli garip çekiciler bahis konusu olduğunda, projeksiyon metodu ayrıntıları içinden çıkılması mümkün olmayan bir karmaşaya döndürmekteydi. Sorunu daha iyi aydınlatan bir teknik, *geri dönüş haritası* ya da *Poincaré dönüşümü* yapmaktı; bu teknikte, tıpkı bir patologun mikroskop camına yerleştireceği doku parçasını hazırladığı gibi, gerçekten de çekicinin karmakarışık haldeki merkezinden ince bir dilim halinde, iki boyutlu bir kesit çıkarılmaktadır.

Poincaré dönüşümünde, bir çekicinin içinden bir boyut çıkarılmakta ve bu suretle devamlı bir çizgi, noktalardan oluşan bir topluluk haline getirilmektedir. Bilim adamı, bir çekiciyi kendi Poincaré dönüşümüne indirgerken, asıl hareke-



BİR ÇEKİCİNİN YAPISININ SERGİLENİŞİ. Yukardaki garip çekici - önce bir yörünge, sonra on, sonra da yüz yörünge - düzenli aralıklarla bir enerji darbesi alarak yönetilen bir rotorun, tam bir daire çizerek sallanan bir sarkacın kaotik davranış biçimini göstermektedir. 1000 yörünge çizildiğinde (aşağıda) çekici artık içine girilemeyecek kadar karışmış bir yumak haline gelmektedir.

Yapının içini görebilmek için, bir çekicinin içinden bilgisayarla bir kesit alınabilir, buna Poincaré kesiti denmektedir. Bu yöntemle üç boyutlu bir resim iki boyuta indirgenmektedir. Güzergâh, bir düzlemden her geçişinde bir nokta işaretlemekte ve en ince ayrıntılarına kadar işlenmiş bir şekil tedricen belirmektedir. Bu örnekte 8000'den fazla nokta vardır, noktaların her biri çekicinin etrafındaki tam bir yörüngenin üzerinde durmaktadır. Gerçekte, sistem düzenli aralıklarla "örneklenmiştir". Enformasyonların bir türü kaybolmuştur; bir başka türü ön plana çıkarılmıştır.

tin büyük kısmını muhafaza ettiği varsayımını aklında tutmaktadır. Mesela, gözlerinin tam önünde vızıldayan, yörüngeleri bilgisayarının ekranında, yukarı aşağı, sola sağa ve ekrandan içeri dışarı oynayıp duran garip bir çekiciyi tahayyül edebilir. Yörünge ekranı her katedişinde, kesişme noktasında parlak bir nokta izi bırakır, bu noktalar da, ya gelişigüzel bir leke oluşturur ya da fosforlu bir şekil çizmeye başlar.

Bu süreç bir sistemin içinde bulunduğu halin devamlı olarak değil de, epeyi sık zaman aralıklarıyla örneklenmesini ifade etmektedir. Araştırıcının bir dereceye kadar tercih hakkı kullanabileceği bir husus, örneklemenin ne zaman yapılacağı - boyut diliminin bir garip çekicinin *neresinden* alınacağı - sorunudur. Bize en iyi fikir verebilecek aralık dinamik sistemin fiziksel bir özelliğine karşılık gelmektedir: Mesela, bir Poincaré dönüşümü bir sarkaç topuzunun hızını en düşük noktasından her geçişinde örnekleyebilir. Ya da araştırıcı belirli bir düzenli zaman aralığı seçip, birbirinin peşi sıra gelen durumları hayali bir strob ışığının parlak aydınlığında dondurabilir. Her iki halde de, bu tür resimler Edward Lorenz'in var olduğunu tahmin ettiği ince fraktal yapıyı sonunda ortaya çıkarmaya başlıyordu.

En basiti olması dolayısıyla en iyi bilgileri veren garip çekici[29] türbülans ve akışkanlar dinamiğinin çok uzaklarında olan bir kişiden gelmiştir. Bu araştırıcı, Fransa'nın güney sahillerindeki Nice Rasathanesinde çalışan Michel Hénon adlı bir gök bilimciydi. Kuşkusuz, astronomi, bir bakıma dinamik sistemlerin çıkış noktasını teşkil ediyordu: Gezegenlerin saat gibi düzenli hareket etmeleri Newton'un ün kazanmasına, Laplace'ın da esinlenmesine neden olmuştu. Fakat, gök cisimlerinin mekaniği dünyadaki sistemlerden, çok önemli bir açıdan farklılık gösteriyordu. Sürtünmeyle enerji kaybeden sistemler sönümlü sistemlerdir. Astronomideki sistemler sönümlü değildir: Saklayıcı sistemlerdir, bunlara Hamilton sistemleri de denir. Gerçekte, hemen hemen sonsuza yakın bir ölçekte, yıldızların enerjilerini dışarıya ışımaları ve gelgite bağlı sürtünmenin kendi yörüngelerinde dolanan cisimlere bir miktar moment kaybettirmesi yüzünden

astronomi sistemleri bile bir tür sürtünmeye maruz kalmaktadır; ancak, uygulamada kolaylık sağlamak için, gök bilimciler hesaplarını yaparken bu sönümü ihmal ediyor olabilirler. Sönüm olmadan, faz uzayının sonsuz bir fraktal katmanlaşma meydana getirebilmesi için gereken şekilde katlanması ve kasılmasına imkân yoktu. Bir garip çekicinin meydana gelmesi hiçbir zaman mümkün olamazdı. Peki kaosun meydana gelmesi mümkün olabilir miydi?

Gök bilimcilerin birçoğu hayatları boyunca dinamik sistemleri bir kere bile düşünmelerine gerek olmadan, uzun mesleki kariyerlerini mutlu bir şekilde sona erdirmişlerdir; fakat Hénon onlardan farklıydı. 1931'de Paris'te doğmuştu, Lorenz'den birkaç yaş daha küçüktü, fakat aynı Lorenz gibi o da matematiğe karşı tatminsiz kalmış bir ilgi duyuyordu. Hénon fiziksel durumlara bağlanabilen küçük, somut problemlerden hoşlanıyordu - "bunlar, insanların bugün yaptığı türden matematiğe benzemez," diyordu. Bilgisayarlar artık meraklıların evlerinde kullanabileceği boyutlara inince, Hénon da bir Heathkit alıp kendisi toplamış ve oynamaya başlamıştı. Aslında, içinden bir türlü çıkamadığı bir dinamik problemiyle özel olarak uğraşmaya bundan çok uzun bir süre önce girişmişti. Uğraştığı problem yıldız kümeleriyle ilgiliydi - gece vakti gökyüzünü dolduran bazen milyonlarcası bir yerde kümelenmiş bu kalabalık yıldız takımları, gökte belki de ilk insandan bu yana herkesin nefesini en çok kesen en eski nesnelerdi. Yıldız kümeleri, içindeki yıldızlar yüzünden akıllara durgunluk verecek derecede yoğundur. Nasıl bir arada durdukları ve zaman içinde nasıl evrim gösterdikleri yirminci yüzyıl boyunca gök bilimcilerin bir türlü içinden çıkamadıkları bir muamma olarak kalmıştır.

Dinamik bir yaklaşımla ifade edersek, bir yıldız kümesi çok cisimli büyük bir problemdir. İki cisimli problemleri çözmek kolaydır. Newton iki cisimli problemi tamamen çözmüştür. Her cisim - mesela yer ve ay - sistemin ortak ağırlık merkezinin çevresinde mükemmel bir elips çizerek dolaşır. Buna çekim gücüne sahip bir nesne daha ilave edersek herşey değişir. Üç cisimli problemin çözümü zordur; zordan da öteye

berbattır. Poincaré'nin keşfettiği gibi, çoğu zaman da çözüm mümkün değildir. Yörüngeler bir süre sayısal olarak hesaplanabilir; hatta uzunca bir süre, belirsizlikler kendini gösterinceye kadar güçlü bilgisayarlarla izlenmeleri mümkündür. Ne var ki, denklemler analitik olarak çözümlenemez; bunun anlamı, üç cisimli bir sistem hakkında uzun süreli sorular varsa bunların cevaplandırılamayacağı demektir. Güneş sistemi istikrarlı mıdır?[30] Kısa sürede hiç şüphesiz istikrarlı görünmektedir; ancak bazı gezegenlerin yörüngelerinin merkezden gittikçe daha uzaklaşarak, sonunda o gezegenlerin ebediyen sistemin dışına kaçmalarına neden olup olamayacağını bugün bile hiç kimse kesinlikle bilmemektedir.

Yıldız kümesi gibi bir sistem doğrudan doğruya çok cisimli bir problem olarak ele alınamayacak kadar karmaşık bir sorundur; fakat bazı uzlaşmalar sayesinde dinamiğini incelemek mümkündür. Mesela, kendine özgü bir ağırlık merkezi olan ortalama bir çekim alanı içinde, her yıldızın kendine bir yol tutturduğunu düşünmek mantığa uygundur. Bununla birlikte, zaman zaman iki yıldız birbirinin o kadar yakınına gelecektir ki, etkileşimlerini ayrı ayrı ele almak zorunluğu doğacaktır. Gök bilimciler de genellikle yıldız kümelerinin istikrarlı olmaması gerektiğini varsaymışlardır. Yıldız kümeleri içinde, küçük ve dar yörüngeler üzerinde ikili bir küme oluşturan yıldızların meydana getirdiği ikili yıldız sistemleri oluşmak eğilimi gösterir; ikili bir yıldız sistemi üçüncü bir yıldızla karşılaştığında, bu üç yıldızdan biri sert bir tekmeye maruz kalabilecektir. Bazı yıldızlar, zaman zaman, böyle bir etkileşim sayesinde o kadar enerji kazanır ki, kaçış hızına erişip yıldız kümesinden ebediyen ayrılır; takımın geride kalan yıldızları biraz daha sıkışırlar. Hénon bu problemi Paris'te doktora tezi olarak incelerken, biraz afakî bir varsayımdan yola çıkmıştı: buna göre, yıldız kümesi ölçek değiştirirken, kendi kendine benzeme özelliğini korumaktadır. Hénon hesaplarına devam ettiğinde akıllara durgunluk verecek bir sonuçla karşılaşmıştır. Yıldız kümesinin çekirdeği kinetik enerji yüklenecek ve sonsuz bir yoğunluk haline geçme gayretine düşerek çökecektir. Bu sonucu hayal etmek bile güçtü;

üstelik o zamana kadar gözlenmiş olan yıldız kümelerinden sağlanan veriler de böyle bir sonucu doğrulamıyordu. Ancak Hénon'un teorisi yavaş yavaş tutmaya başlamıştır - sonraları buna "gravotermal çöküş" teorisi adı verilmiştir.

Hénon böylece kazandığı güçle, matematiği eski problemlere uygulamak ve elde ettiği en beklenmedik sonuçları en olmayacak çıktılarına kadar kovalamak arzusuyla, yıldızlar dinamiğinde çok daha kolay bir problem üzerinde çalışmaya başladı. Bu kez, 1962 yılında ziyaret ettiği Princeton Üniversitesinde, tıpkı Lorenz'in M.I.T.'de meteoroloji araştırmalarında bilgisayar kullanmaya başladığı gibi, Hénon da ilk defa olarak bilgisayardan yararlanmaya başladı. Yıldızların kendi galaksi merkezleri çevresindeki yörüngelerini modellemeye başladı. Yeterince sade bir yaklaşımla, galaksi yörüngelerine bir güneş çevresinde dolaşan gezegenlerin yörüngeleri gibi bakılabilir, bunun bir istisnası vardır: Merkezi ağırlık kaynağı bir nokta değil, kalınlığı olan üç boyutlu bir disk şeklindedir.

Hénon diferansiyel denklemlerle bir uzlaşma sağladı. "Deneyde daha fazla serbestlik sağlayabilmek amacıyla,"[31] diyordu, "bir an için, problemin gökbilimsel kökenini unutuyoruz." O zaman açıkça söylememesine rağmen, "deneyde serbestlik" ifadesinin anlamı, bir bakıma, problemi alıp ilkel bir bilgisayarda evirip çevirerek oynamak demekti. Hénon'un kullandığı makinenin hafıza gücü, yirmi beş yıl sonra piyasaya çıkacak bir kişisel bilgisayarın bir tek çipinin hafıza gücünün binde birinden bile daha düşük olduğu gibi, çok da yavaş çalışıyordu. Neyse ki, kaos olgusu üzerinde daha sonraki tarihlerde çalışan uygulamalı fizikçiler gibi, Hénon da yaptığı aşırı sadeleştirme işleminin yararını gördü. Sırf sisteminin özünü soyutlaması sayesinde, bundan çok daha önemli olan başka birtakım sistemler için de geçerli olacak buluşları gerçekleştirdi. Yıllar sonra, galaksi yörüngeleri hâlâ teorik bir oyun olma niteliğini muhafaza etmekteydi; fakat, yüksek enerji hızlandırıcıları içindeki parçacıkların yörüngeleri konusuyla ilgilenen kimseler ve nükleer füzyonun oluşturulması için manyetik plazmaların sınırlandırılması konusuyla ilgilenen

kimseler, bu gibi sistemlerin dinamiği üzerinde yoğun ve pahalı araştırmalar gerçekleştiriyordu.

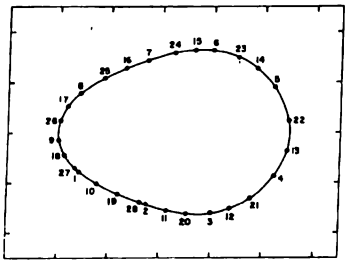
Galaksilerde, yaklaşık 200 milyon yıl kadar bir zaman ölçeğindeki yıldız yörüngeleri kusursuz elipsler çizmek yerine üç boyutlu bir nitelik kazanırlar. Üç boyutlu yörüngeleri gözünde canlandırmak bu yörüngeler gerçek iken ne kadar zorsa bu yörüngeler faz uzayında hayali olarak inşa edilmiş olunca da o kadar zordur. Bu yüzden Hénon, Poincaré dönüşümlerinin yapılışında kullanılan tekniğe benzeyen bir teknikten yararlandı. Galaksinin bir yüzüne dikey olarak yerleştirilen düz bir levha tahayyül etti; yörüngelerin her biri, tıpkı hipodromdaki bütün atların finiş çizgisini geçmeleri gibi, bu levhayı geçecekti. Sonra yörüngenin bu düzlemi geçtiği noktayı işaretledi ve bu noktanın yörüngeden yörüngeye yaptığı hareketi çizdi.

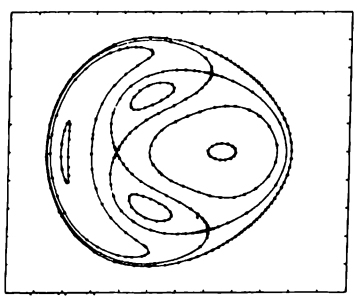
Hénon bu noktaları eliyle işaretlemek zorundaydı; fakat, sonradan bu tekniği kullanan birçok bilim adamı, tıpkı, hava karardıktan sonra teker teker yanan uzaktaki sokak lâmbaları gibi, bu noktaların da bilgisayar ekranında belirmeye başlayışını seyredebilmişlerdir. Yörüngelere has bütün özellikleri taşıyan bir yörünge sayfanın sol alt kısmına doğru bir yerde bulunan bir noktadan başlar. Bundan sonra, bir sonraki dönüşte, birkaç santimetre daha sağda bir nokta belirir. Sonra bir başkası, daha sağda ve biraz daha yukarda belirir ve bu böylece devam eder. Başlangıçta hiçbir şekil belirgin değildir, fakat on, yirmi kadar nokta belirdikten sonra, yumurtaya benzeyen bir eğri şekillenmeye başlar. Birbirinin ardı sıra dizilen noktalar gerçekte eğrinin etrafında bir devre oluşturur; ancak tekrar tam aynı yerden geçmedikleri için sonuçta, yüzlerce ya da binlerce nokta belirdikten sonra eğrinin çizimi tamamen ortaya çıkmış olur.

Bu gibi yörüngeler tamamen düzenli değildir, çünkü kendi kendilerini tam olarak hiç tekrarlamazlar; fakat tabii ki öngörülmeleri mümkündür; kesinlikle de kaotik nitelikli değildirler. Noktalar hiçbir zaman eğrinin içine ya da dışına düşmezler. Tekrar üç boyutlu bir resme dönüştürüldüğü zaman, yörüngeler yuvarlak silmeli bir sütun kaidesi şeklinde, ya da

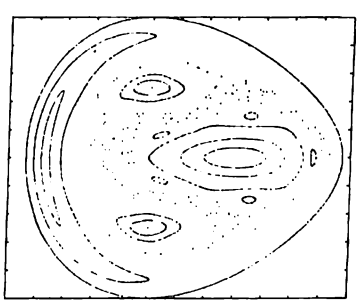
bir donat şeklinde çizilmekteydi; Hénon'un yaptığı transformasyon da bu kaidenin bir kesitinden ibaretti. Hénon'un, o zamana kadar, bütün seleflerinin tartışmadan kabullendikleri bir olguyu ortaya koymaktan başka bir şey yaptığı söylenemezdi. Buna göre, yörüngeler periyodikti. Kopenhag Rasathanesinde,[32] 1910'dan 1930'a kadar birçok gök bilimci bu yörüngelerden yüzlercesini büyük sıkıntılara katlanarak sabırla gözlemiş ve hesaplarını yapmışlardı - fakat bu gök bilimciler sadece periyodik olduğu anlaşılan yörüngelerle ilgilenmişlerdi. Hénon "O zamanlar ben de, herkes gibi, bütün yörüngelerin böyle düzenli olması gerektiğine inanmıştım."[33] diyordu. Buna rağmen, hem kendisi hem de Princeton'da yanında doktora yapan Carl Heiles adındaki öğrencisi, kurdukları soyut sistemdeki enerji düzeyini düzgün bir şekilde arttırarak farklı yörüngeleri hesaplamaya devam ettiler. Kısa bir süre sonra tamamen yeni bir olayla karşılaştılar.

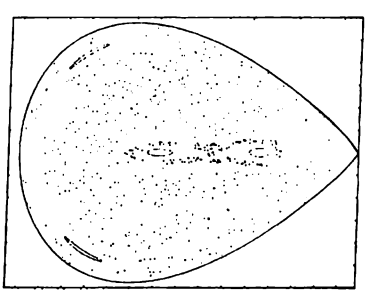
Yumurta biçimindeki eğri ilk başta bükülerek daha komplike bir şekil aldı; sekiz rakamları çizercesine kendi üzerinden geçmeye ve birbirinden kopuk sarmallar halinde bölünmeye başladı. Gene de her yörünge bu sarmallardan birinin üzerine düşüyordu. Bundan sonra, enerjinin daha yükseldiği düzeylerde, birdenbire başka bir değişiklik daha meydana çıktı. Hénon ve Heiles bunu görünce, "İşte sürpriz çıkageldi,"[34] diye yazdılar. Yörüngelerden bazıları o kadar istikrarsız hale geldi ki noktalar kâğıdın üstünde gelişigüzel bir biçimde dağılmaya başladılar. Bazı yerlerde, eğrileri çizmek hâlâ mümkün olabiliyordu; bazı yerlerde ise noktalara uyabilen hiçbir eğri yoktu. Resim tamamen dramatik bir görünüm almıştı: bir yandan tam bir düzensizlik, öte yandan evvelce var olan bir düzeni hatırlatan izler birbirine karışmış vaziyetteydi; böylece, bu iki gök bilimciye "adalar" ve "sıra adalar" isimlerini ilham eden şekillerin oluştuğu bir manzara ortaya çıkmıştı. İki farklı bilgisayar kullanıp iki farklı entegrasyon yöntemi uyguladılar; sonuçlar gene aynı çıktı. Yapabildikleri tek şey araştırıp spekülatif beyanlarda bulunmaktı. Tamamen sayısal deneylerine dayanarak, bu gibi resimlerin yapısındaki derinlik hakkında bir tahminde





GALAKSİ MERKEZİNİN ÇEVRESİNDEKİ YÖRÜNGELER. Michel Hénon, yıldızların bir galaksi içindeki güzergâhlarını anlayabilmek için bir yörüngenin bir düzlemle kesişmelerini hesaplamıştır. Bundan çıkan şekiller sistemin toplam enerjisine bağımlıdır. İstikrarlı bir yörünge üzerindeki noktalar devamlı, birbirine bağlantılı bir eğriyi tedricen meydana getirmiştir (solda). Bununla birlikte diğer enerji düzeylerinde, istikrar ve kaos karışık vaziyette meydana çıkar; bunlar da dağınık noktalardan oluşan bölgeler halinde gösterilmiştir.

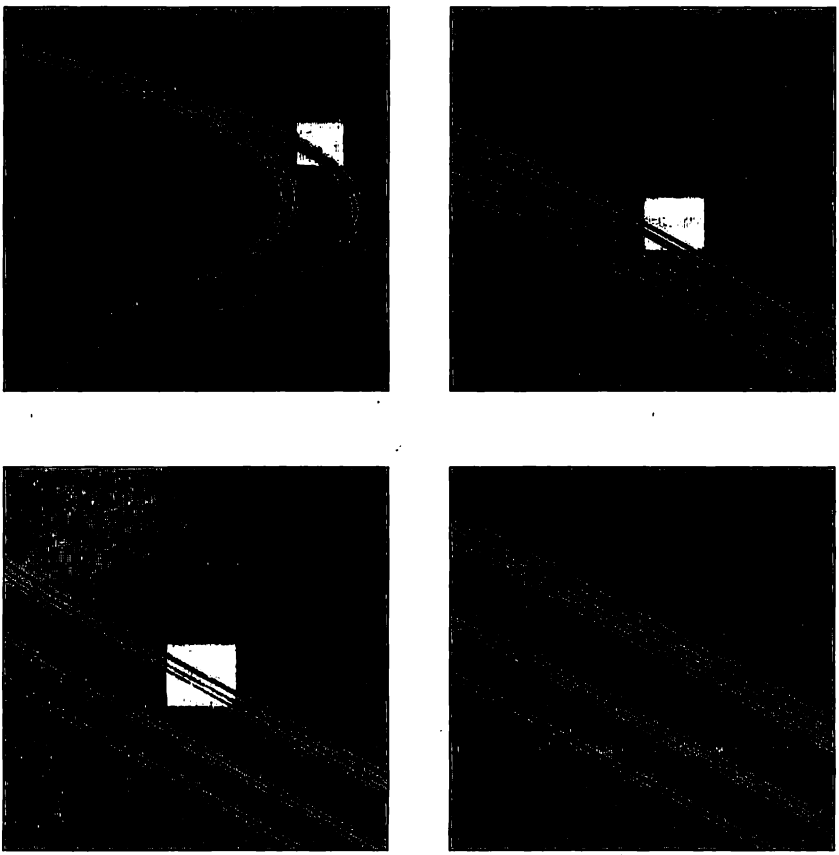




bulundular. Önermelerine göre, resim daha büyütüldüğü takdirde, ölçekler gittikçe küçülürken, hatta belki de sonsuza doğru yol alırken daha fazla sayıda ada ortaya çıkacaktı. Bunun için matematiksel kanıtlar gerekliydi - "ancak, bu problemi matematiksel bir yaklaşımla ele almak sanıldığı kadar kolay değildi."[35]

Hénon başka problemlerle de ilgilenmeye devam etti; ancak on dört yıl sonra, David Ruelle ve Edward Lorenz'in garip çekicilerini nihayet öğrendiğinde, bu konuda duyduğu her şeyi can kulağıyla dinlemeye hazırdı. 1976'ya doğru Nice şehrinin Büyük Kordon caddesinde Akdenizin üzerine asılmış gibi bir yere inşa edilmiş olan Nice Rasathanesine geçmiş ve Rasathaneyi ziyarete gelen bir fizikçiden[36] Lorenz'in çekicisini dinlemişti. Bu fizikçi çekicinin "mikro düzeydeki yapısını" çözmek amacıyla değişik teknikler kullanmış fakat bir türlü başarı elde edememişti. Sönümlü sistemler konusu Hénon'un uzmanlık alanına girmemekle birlikte ("bazen gök bilimciler sönümlü sistemlerden ürkerler - bu sistemleri dağınık bulurlar")[37] aklına bir düşünce geldi.

Hénon bir kez daha, bu sistemin fiziksel kökenine ait ne varsa hepsini dışarı atıp sadece konunun araştırmak istediği geometrik özü üzerinde yoğunlaşmaya karar verdi. Lorenz ve diğer bazı bilim adamları diferansiyel denklemlere - uzay ve zaman içinde *sürekli* değişme gösteren akışlara - takılmışlardı; Hénon ise zaman içinde birbirinden ayrı duran fark denklemlerine baktı. Burada, faz uzayının tekrar tekrar uzatılıp katlanmasını konuyu çözebilecek anahtar olarak görüyordu; bu işlem tıpkı bir pastacı ustasının hamuru yuvarlayıp katlamasına, sonra tekrar yuvarlamasına, katlamasına ve sonuçta ince katmanlardan oluşan bir demete benzeyen bir yapı meydana getirmesine benziyordu. Hénon bir kâğıt sayfası üzerine düz bir oval şekil çizdi. Bunu çekip uzatmak için kısa bir sayısal fonksiyon seçti; bu fonksiyon ovalin içindeki herhangi bir noktayı yerinden oynatıp, merkezde yukarı doğru çekilmiş kavisli bir biçimde, yeni bir noktaya götürebiliyordu. Bununla bir harita çıkarmış, bütün ovali kavisin üstüne nokta nokta "tatbik etmiş" oluyordu.



HÉNON'UN ÇEKİCİSİ. Katlama ve gerip uzatma işlemlerinin basit bir biçimde bir araya gelmesi hesaplanması kolay olmasına rağmen matematikçilerin zor anlayabildiği bir çekici meydana getirmiştir. Binlerce, sonra da milyonlarca nokta belirdikçe, görünen ayrıntılar da artmaktadır. Doğrular halinde görülen çizgiler büyütüldüğü zaman, bunların çift çizgiler, sonra çift çizgilerden çıkan başka çift çizgiler oldukları anlaşılmaktadır. Buna rağmen, arka arkaya gelen iki noktanın yan yana mı yoksa birbirinden çok uzakta mı belireceğini öngörmek mümkün değildir.

Sonra ikinci bir uygulama seçti, bu seferki kavisi içeri doğru çekip daha dar hale getiren bir kasılmaydı. Ondan sonra seçtiği üçüncü uygulama dar kavisi bir yana doğru yatırıp, ilk baştaki ovalin çizgilerinin tam üstüne gelmesini sağladı. Bu üç uygulama da, hesap işlemlerinin kolay olması için, tek bir fonksiyon içinde bir araya getirilebiliyordu.

Hénon düşünce olarak, Smale'in at nalı fikrini takip etmekteydi. Sayısal olarak, bütün süreç o kadar basitti ki hesap makinesiyle bile izlenmesi mümkün olabilirdi. Her noktanın yatay ve dikey konumunu belirlemek için bir x koordinatı, bir de y koordinatı vardı. Yeni x'i bulmak için, kural eski y'yi almak, ona 1 eklemek ve eski x'in karesini alıp bundan 1.4 kere çıkarmaktır. Yeni y'yi bulmak için eski x 0.3 ile çarpılacaktı. Böylece: $x_{yeni}=y+1-1.4x^2$ ve $y_{yeni}=0.3x$. Hénon oldukça gelişigüzel bir biçimde yeni bir başlangıç noktası seçti, hesap makinesini alıp birer birer yeni noktaların yerlerini saptamaya başladı ve yerini saptadığı noktalar binlere ulaşıncaya kadar bu işleme devam etti. Sonra da gerçek bir bilgisayara, bir IBM 7040'a geçti ve hızla beş milyon noktanın yerini belirledi. Bugün, grafik monitörü olan bir kişisel bilgisayarla çalışan herkes bu işlemi kolaylıkla yapabilir.

Başlangıçta, noktalar sanki ekran üzerinde gelişigüzel olarak sıçramaktadır. Bu görünüm, üç boyutlu bir çekiciden alınmış bir Poincaré kesitinin, ne yapacağı belli olmaksızın, ekran üzerinde ileri geri dolaşmasından çıkan sonuçla aynıdır. Hızla bir şekil belirlemeye başlayarak, muza benzeyen bir eğri çizilir. Programın çalışması uzadıkça, daha çok ayrıntı ortaya çıkar. Çizginin yer yer daha kalınlaştığı görülür, fakat çizgi kalınlaştıktan sonra birbirinden iyice ayırt edilen iki çizgiye, sonra bu iki çizgi dört çizgiye bölünmekte, çizgilerden ikisi beraber devam ederken diğer ikisinin de araları epeyi açılmaktadır. Resim iyice büyütüldüğünde, dört çizginin her birinin daha ikişer çizgiden oluştuğu ve bunun böylece sonsuza kadar devam ettiği görülmektedir. Lorenz'in çe-

kicisi gibi, Hénon'un çekicisi de sonsuz bir regresiyonu ortaya koymakta, birbiri içinden çıkan Rus bebekleri gibi bitmez tükenmez bir dizi manzarası sergilemektedir.

Çizgi içinde çizgiden oluşan bu ayrıntı yumağının son şeklini gittikçe büyütülen bir dizi resimde iyice görmek mümkündür. Garip çekicinin ürkütücü etkisini değerlendirmenin bir başka yolu da, şeklin, nokta nokta oluşarak, zaman içinde belirgin hale gelmesidir. Sanki sislerin içinden gelen bir hayalet gibi ortaya çıkmaktadır. Yeni noktalar ekran üzerine o kadar gelişigüzel biçimde dağılmaktadır ki bırakın orada çok girift ve ince bir yapı görmeyi, gerçekten bir yapı olduğuna bile inanmak imkânsız hale gelmektedir. Birbirini takip eden herhangi iki nokta birbirinden o kadar keyfice uzaktır ki, tıpkı türbülanslı bir akışta, başlangıçta birbirinin yanı başında bulunan iki noktaya benzerler. Noktaların sayısı ne olursa olsun, bir noktadan sonra çıkacak noktanın nerede görüneceğini tahmin etmek imkânsızdır - bunun bir istisnası vardır: bilebileceğimiz tek şey noktanın çekicinin herhangi bir yerinde olacağıdır.

Noktalar o kadar gelişigüzel dolaşmakta, şekil o kadar esîrimsi görünmektedir ki bu şeklin bir *çekici* olduğunu hatırlamak bile güç olmaktadır. Buna, dinamik bir sistemdeki herhangi bir güzergâh olarak bakmamalıdır. Bu güzergâh, diğer bütün güzergâhların gelip yakınsadığı bir güzergâhtır. İşte bu yüzden başlangıçtaki şartların seçiminin hiçbir önemi yoktur. Başlangıç noktası çekicinin yakınlarında bir yerde olduğu sürece, arkadan gelen birkaç nokta büyük bir hızla çekiciyle yakınsamaya doğru yol alacaktır.

Bundan yıllar önce, David Ruelle 1974'te Gollub ve Swinney'in City College'deki laboratuvarına geldiği gün, Ruelle, Gollub ve Swinney aralarında teori ve deney düzeyinde zayıf birtakım bağlar bulunduğunu fark ettiler. Bir tarafta, felsefi açıdan cüretkâr fakat, teknik olarak belirsizlikler içeren matematiksel bir yaklaşım. Diğer tarafta, uzun uzadıya bakmaya değer bir şey olmayan fakat, eski teoriyle ters düştüğü açık ve seçik olarak görülen türbülanslı bir akışkan. Üç fizikçi bütün bir öğleden sonrayı konuşarak geçirdi, sonra da

Swinney ve Gollub, eşleriyle birlikte tatile çıkarak Gollub'un Adirondack dağlarındaki dağ evinde kalmaya gitti. Swinney ve Gollub hayatlarında hiç garip bir çekici görmemişlerdi; türbülans eşiğinde gerçekte meydana gelebilecek şeylerin birçoğunu da ölçmemişlerdi. Bununla birlikte, Landau'nun yanıldığını biliyorlardı; Ruelle'in doğruluğu konusunda da birtakım tereddütleri vardı.

Bilgisayarların araştırmalarda kullanılmasından sonra, evrenin ifşa ettiği sırlardan biri olan garip çekici ilk başta bir ihtimal olarak görülmüş, büyük hayal gücüne sahip birçok yirminci yüzyıl bilgininin ilgisini çekmeyen bir köşede kalmıştı. Ancak kısa bir zaman sonra, bilim adamları bilgisayarların neler göstermeye kadir olduğunu görünce, garip çekiciyi sanki, türbülanslı akışlardan yükselen bir müzik ya da tül gibi göklere yayılan bulutlar misali, her yerde rastlayıp gördükleri bir simaya benzetmeye başladılar. Doğa bir zorlamaya tabi tutuluyordu. Sanki, düzensizlik aynı ortak temayı paylaşan birtakım şekillere doğru kanalize ediliyordu.

Daha sonraları, garip çekiciler olgusunun tanınıp kabul edilmesi, sayısal yöntemlerle araştırma yapan kimselere açık ve seçik bir programı uygulama imkânı vermek suretiyle kaostaki devrimin de devam etmesini sağlamıştır. Bilim adamları her tarafta, doğanın gelişigüzel davrandığı izlenimi verdiği her yerde garip çekiciler aramaya başladılar. Birçok kimse, Yerin atmosferinin belki de garip bir çekicinin üzerine dayandığını iddia ediyordu. Başka kimseler sermaye piyasasından milyonlarca veri toplamış[38] ve bilgisayarın ayarlanabilen merceğinden gelişigüzelliği seçmeye çalışarak, borsada da bir garip çekici olup olmadığını aramaya başlamışlardı.

1970'li yılların ortalarında bu buluşlar henüz geleceğe aitti. Daha hiç kimse deney sırasında bir garip çekici görmüş değildi, nasıl aranacağı hakkında da kimsenin bir şey bildiği yoktu. Bir garip çekici teorik olarak, kaosun temelinde bulunan yeni özelliklerine matematiksel bir içerik verebilirdi. Başlangıç durumuna hassas bağımlılık bunlardan biriydi. Bir başkası, "karıştırma" idi; bu da mesela, jet motoru di-

zayn ederken yakıtla oksijenin en verimli şekilde bir araya gelmesini sağlamak isteyen bir mühendis için anlam ifade ediyordu. Ne var ki, bu özelliklerin nasıl ölçüleceğini, bunların sayılarla nasıl ifade edileceğini hiç kimse bilmiyordu. Garip çekiciler fraktal görünümlüydü; bunun anlamı gerçek boyutlarının kesirle ifade edilmesi gerektiğiydi, ancak boyutun nasıl ölçüleceğini ya da böyle bir ölçümün mühendislikle çözülmeye çalışılan problemlerde nasıl kullanılacağını bilen hiç kimse yoktu.

Daha da önemlisi, garip çekicilerin nonlineer sistemlerden kaynaklanan derin problemlerin çözümü konusunda hiçbir bilgi sağlayıp sağlamadığını da bilen hiç kimse yoktu. Kolayca hesaplanan ve kolayca sınıflandırılan lineer sistemlerden farklı olarak, nonlineer sistemler, her biri diğerinden farklı olduğundan, doğaları itibariyle, hiçbir sınıflandırmaya gelmez görünüyorlardı. Bilim adamları bunların ortak bazı özellikleri olduğundan bile şüphe etmeye başlamışlardı; ama sıra ölçmeye ve hesap işlemlerini yapmaya gelince her nonlineer sistemin kendi başına bir âlem olduğu meydana çıktı. Nonlineer sistemlerden birini anlamak bir sonrakinin anlaşılmasında yardımcı olabilecek hiçbir unsur sağlamıyordu. Madem ki, Lorenz'in çekicisi gibi bir çekici, bir sistemin istikrarını ve gizli yapısını ortaya koyuyor ve bu yapılmadığı zaman o sistem tamamen şekilsiz görünebiliyordu, o halde nasıl oluyor da bu özel çifte sarmal aralarında ilişki olmayan sistemleri bilginlerin araştırmasına yardımcı oluyordu?

Artık, duyulan heyecan katışıksız bilimin de sınırlarını aşmış bulunmaktadır. Bu şekilleri gören bilim adamları bilimsel söylemin kurallarını bir an için unutmanın uygun olacağını düşünmüşlerdir. Mesela, Ruelle'in şu sözlerine bakın: "Garip çekicilerin estetik cazibesinden hiç bahsetmedim. Eğrilerden oluşan bu sistemler, noktalardan oluşan bu bulutlar bazen havai fişekleri ya da galaksileri, bazen de bitkilerin garip ve ürkütücü bir tarzda çoğalmasını andırmaktadır. Orada, araştırılacak şekillerin meydana getirdiği koskoca bir âlem, keşfedilmeye değer öyle ahenkler var ki."[39]

Evrensellik

Bu mısraları tekrarladığın yerden altın çıkar;
Yere çizilen bu çemberden
Girdaplar, fırtınalar, yıldırım ve şimşekler çıkar.

MARLOWE,
Dr. Faustus,

Çağlayanın kırk, elli metre* yukarısında, sakin sakin akan dere sanki aniden düşeceğini sezmiş gibidir. Su birden hızlanmaya ve çırpınmaya başlar. Suyun yüzündeki küçük akıntıcıklar şişmiş, atan damarlar gibi kabarmıştır. Mitchell Feigenbaum derenin kıyısında ayakta durmaktadır. Spor ceket ve kadife pantalon kıyafeti içinde hafifçe terlemekte ve sigarasından ciğerlerine çektiği dumanı havaya savurmaktadır. Arkadaşlarıyla yürüyüşe çıkmışlar; arkadaşları daha önden gidip derenin yukarı kısımlarındaki havuzlara yürümüşlerdir. Feigenbaum, birdenbire, tenis maçında topun bir oyuncudan öbür oyuncuya hızla gidiş gelişini takip eden bir seyirci gibi, başını bir o yana, bir bu yana çevirmeye başlar. "Gözünüzü bir şeye dikin, bu bir köpük olabilir ya da başka bir şey. Başınızı hızla çevirirseniz, suyun yüzeyinin bütün yapısını birdenbire ayırt edebilir ve bunu midenizin içinde hissedebilirsiniz."[1] Sigarasından bir nefes daha çeker. "Derin matematik bilgisi olan bir kişi iseniz böyle bir manzaraya baktığınız zaman veya bulutların pufla üstüne pufla konmuş gibi yumuşak ve kabarık halini gördüğünüz zaman ya da denizde fırtına varken bir dalgakıranda durduğunuz zaman gerçekten de hiçbir şey bilmediğinizi anlarsınız."

*İngilizce metinde yarda. (ç.n.)

Kaos içinde düzen. Bu ifade bilimin en eski klişe sözlerinden biriydi. Doğada gizli bir birlik ve ortak bir temel biçim bulunduğu fikri insanlara her zaman cazip gelmiş ve geçmişte, sözde bilim adamlarıyla eksantrik kimselerin ilham kaynağını teşkil etmek gibi bir talihsizliği de yaşamıştır. Feigenbaum, otuzuncu yaş gününe tam bir yıl kala, 1974'te Los Alamos Ulusal Laboratuvarına geldiğinde[2] şunun bilincine varmıştı: fizikçiler bu fikirden hareketle bir yerlere varmak istiyorlarsa önce bunu pratik bir çerçeveye oturtmaları, yani fikirleri alıp hesap işlemleri haline dönüştürmeleri gerekiyordu. Ancak bu probleme ilk kez nasıl yaklaşılacağı hakkında kimsenin doğru dürüst bir fikri yoktu.

Feigenbaum'u bu işe, 1973'te Cornell'den gelerek Teorik Çalışmalar Bölümünün başına geçen sakin, hiç göstermediği halde tam bir dahi fizikçi olan Peter Carruthers almıştı. Carruthers bölümün başına geçer geçmez ilk olarak beş, altı kıdemli bilim adamının işine son vermiş - Los Alamos'ta işe alınan kişilerin Üniversitede öğretim üyeliğindeki gibi ömür boyu istihdam güvencesi yoktur- ve bunların yerine bizzat kendi seçtiği istikbali parlak genç araştırıcılar almıştı. Bir araştırma bölümünün yöneticisi olarak, Carruthers çok iddialı bir kimseydi, fakat bilimin her zaman planlanmaya gelmediğini de kişisel tecrübelerine dayanarak biliyordu.

"Laboratuvar'da ya da Washington'da bir komisyon kursaydınız ve deseydiniz ki: 'Türbülans gerçekten bizim daha fazla yol almamızı engellemektedir, bunun ne olduğunu anlamalıyız, bunu anlamakta yetersiz kalışımız, birçok alandaki ilerleme şansımızı gerçekten yok etmektedir,' tabii ki ilk yapacağınız iş bir ekip kurmak olurdu. Dev bir bilgisayar da alırdınız. Büyük programlarla çalışmaya başlardınız. Sonra da bütün bunların boşa olduğunu anlardınız. Bunun yerine bizim akıllı bir adamımız var; köşesinde sakin sakin oturur - tabii insanlarla da konuştuğu olur - ama çoğu zaman kendi kendine çalışır."[3] Kendi aralarında türbülanstan bahsetmişlerdi, ancak, aradan epeyi zaman geçmişti, şimdi Carruthers bile Feigenbaum'un çalışmasını hangi yönde sürdürdüğünden artık emin değildi. "Bu meseleyi bırakıp daha değişik

bir probleme el attığını sanmıştım. Öbür problemin de *aynı* problem olduğunu pek biliyordum diyemem. Bu sorun, galiba birçok bilim dalının gelip gelip takıldığı sorundu - hepsi sistemlerin nonlineer davranış biçiminin bu veçhesine gelip takılıyorlardı. Şimdi, bu problemin asıl temeline inebilmek için, parçacık fiziğini bilmek, kuantum alan teorisi hakkında biraz bir şeyler bilmek ve kuantum alan teorisinde renormalizasyon grubu olarak bilinen bu yapıların bulunduğunu da bilmek gerektiğini hiç düşünen olmamıştı. Ayrıca, stokastik süreçlerin genel teorisinden, hatta fraktal yapılardan da anlamak gerektiğini bilen yoktu.

"Mitchell kalifikasyonları itibariyle tam bu iş için biçilmiş kaftandı. Yapılması gereken işi tam zamanında yapar, hem de çok iyi yapardı. Hiçbir işi yarım bırakmamıştır. Uğraştığı problemi tamamen çözmüştür."

Feigenbaum uğraştığı bilim dalının zor problemleri - nonlineer problemleri - anlamakta yetersiz kaldığı kanısını Los Alamos'a da taşımıştır. Fizikçi olarak ortaya hemen hemen yeni hiçbir şey koymadığı halde, temelde olağandışı bir entelektüel birikimi vardı. En zorlu matematik analizleri yapmaya yetecek kadar derin ve etkin bir analiz bilgisiyle, birçok fizikçinin fikrî kapasitesinin limitlerini zorlayan yeni enformatik tekniklerine vâkıftı. On sekizinci yüzyılın Romantizm akımlarından kalma ve görünürde bilimselliği olmayan birtakım fikirleri kafasından tamamen silip atmamaya da özen gösteriyordu. Yeni bir bilimin temellerini kurmak istiyordu. Bunun için önce, gerçek karmaşıklığı anlamaya ilişkin bütün fikirleri bir yana bırakıp bunun yerine, bulabileceği en basit nonlineer denklemlere yönelmekle işe başladı.

Evren kendi esrarını,[4] Mitchell Feigenbaum'a, ilk defa olarak, dört yaşında iken, İkinci Dünya Savaşından henüz sonra ailesinin Brooklyn'in Flatbush kesiminde ikamet ettiği apartman dairesinin oturma odasında bulunan Silverstone marka bir radyo aracılığıyla ifşa etmiştir. Müziğin elle tutulur, gözle görülür bir kaynak olmadan duyulmasını küçük Feigenbaum'un aklı bir türlü almıyordu. Buna karşılık

pikapı sanki anlayabiliyordu. Anneannesi ona 78'lik taş plakları koyup çalması için özel olarak izin vermişti.

Babası New York Liman İdaresinde çalışan bir kimyagerdi, sonra da Clairol'da çalışmaya başladı. Annesi şehirdeki devlet okullarında öğretmenlik yapıyordu. Mitchell önceleri elektrik mühendisi olmaya karar verdi; Brooklyn'de mühendisliğe insana rahat hayat sağlayan bir meslek olarak bakılırdı. Sonraları, bir radyo hakkında ne bilmek istiyorsa bütün cevapları fizikte bulabileceğinin farkına vardı. Feigenbaum New York'un banliyösünde yetişip şehrin büyük liselerinden geçen - o da Samuel J. Tilden'de okumuştu - sonra da City College'e devam ederek parlak kariyerlere adım atan bilim adamlarının kuşağına dahildi.

Brooklyn'de akıllı uslu yetişmek demek, insanın, bir bakıma kendi kafasındaki dünyası ile başka insanların dünyası arasındaki eşitsiz bir yarışta mücadele etmesi demekti. Feigenbaum gençken çok sosyal bir insandı, bu vasfın hayatta başarı kazanmak için önemli bir koz olduğuna da inanıyordu. Ancak, bir şeyleri öğrenebileceğinin de bilincine vardığında birden uyandı. Arkadaşlarından gittikçe daha çok kopmaya başladı. Günlük hayattaki havadan sudan konuşmalar artık onu tatmin etmiyordu. Fakültenin son sınıfında iken birdenbire gençliğini yaşamamış olduğunun farkına varıp insanlarla yeniden sosyal temaslar kurmak amacıyla kendi kendine fikirler geliştirdi. Kafeteryada sessiz sedasız oturuyor, etrafında sakalını traş etmek ya da yiyip içmek konularında gevezelik eden öğrencileri dinliyor ve insanlarla sohbet etme ilmini yavaş yavaş yeniden öğrenmeye çalışıyordu.

1964'te mezun olup öğrenimine Massachusetts Institute of Technology'de (Massachusetts Teknoloji Üniversitesi) devam etti ve orada 1970'de elemanter parçacık fiziği dalında doktorasını tamamladı. Bundan sonra, Cornell'de ve Virginia Polytechnic Institute'de (Virginia Teknik Üniversitesi) dört verimsiz yıl geçirdi - verimsizliği, Üniversitedeki genç bir araştırma görevlisinin başa çıkabileceği türden problemlerle ilgili çalışmalarıyla ilgili olarak düzenli yayın yapması bakımından çok önemli yıllar olmasından dolayı idi. Doktora

üstü öğrencilerinin makaleler yayınlaması beklenirdi. Zaman zaman bir danışman[5] Feigenbaum'a belirli bir problem konusunda neler olduğunu sorar, o da şu cevabı verirdi: "Ha, ben o problemi anladım."

Çok yüksek vasıflara sahip bir bilim adamı olan Carruthers Los Alamos'a ilk yerleştiği zamanlarda, kendisinde yeni kabiliyetleri keşfetme yeteneği bulunduğundan övünerek bahsetmekteydi. Carruthers beğendiği kimselerde zekâ değil, sanki sihirli bir bezeden akan bir tür yaratıcılık yeteneği arıyordu. Her zaman Kenneth Wilson'un başından geçenleri hatırlardı; Wilson da, sanki hiçbir şey üretmez gibi görünen, kendisi gibi Cornell'den gelmiş, yumuşak sözlü bir fizikçiydi. Wilson'la kim uzunca bir süre oturup konuştuysa onun fizik konusunun derinliğine inebilme kapasitesine sahip olduğunu hemen fark ederdi. O yüzden, Wilson'un profesörlüğünün onaylanması ciddi bir tartışma konusu oldu. Fizikçiler Wilson'da bulunan potansiyeli ispat edecek bir şey yapmayışını onun aleyhindeki bir koz olarak kullanmak isteyince ortalık birbirine girdi. Onun üzerine Wilson'un çekmecelerinden seller gibi öyle makaleler döküldü ki bunların arasında, 1982'de Nobel Ödülünü de kazanmasını sağlayan çalışmaları da bulunuyordu.

Kaos teorisinin önemli atalarından biri olarak Wilson'un fizik alanındaki en büyük katkısı, Leo Kadanoff ve Michael Fisher adlı başka iki fizikçinin de yaptığı çalışmalar sonunda ortaya çıkmıştır. Çalışmalarını ayrı ayrı yürüten bu bilim adamları faz geçişlerinde neler olduğu hakkında düşünürken farklı yollardan gidiyorlardı. Maddenin bir durumdan başka bir duruma - sıvı halden gaz haline ya da mıknatıssız halden mıknatıslı hale - geçtiği noktanın yakınındaki davranış biçimini inceliyorlardı. Faz geçişlerinin, var olan iki ayrı âlemi birbirinden ayıran özel sınırlar olarak, kendi matematiksel mantıkları içinde ileri derecede nonlineer oldukları görülüyordu. Maddenin belirli bir durumdaki düzgün ve öngörülebilir davranış biçimine bakarak, geçişlerin niteliğini anlamak pek kolay olmamaktadır. Sobanın üstüne konan bir bakraç su kaynama noktasına erişinceye kadar düzenli

bir şekilde ısınır. Bundan sonra sıcaklıktaki değişme kısa bir duruşa geçerken sıvı ile gaz arasındaki moleküler ara yüzeyde çok ilginç bir şeyler olmaya başlar.

Kadanoff 1960'lı yıllarda bu problemin üstüne eğilirken[6] faz geçişi kendisine entelektüel düzeyde bir bulmaca gibi görünmüştür. Mıknatıslanmakta olan bir metal blokunu düşünün. Düzenli bir duruma doğru giderken, bir karar vermek zorundadır. Mıknatıs ya bir tarafa ya da öbür tarafa yönlendirilebilir. Seçmekte serbesttir. Ancak, metalin en küçük her parçası aynı tercihi yapmak zorundadır. Bu nasıl olacaktır?

Seçim süreci sırasında, metalin atomları şu veya bu şekilde birbirlerine enformasyon iletmektedir. Kadanoff'un yaklaşımı bu haberleşmenin en basit şekliyle bir ölçek sorunu olarak betimlenebileceği idi. Gerçekten de, metali kutu şeklinde parçalara böldüğünü tahayyül etmiştir. Her kutu kendi yanındaki komşu kutularla haberleşmektedir. Bu haberleşmeyi betimlemek için başvurduğu yöntem, herhangi bir atomun komşusu olduğu atomlarla haberleşmesini betimlemek için kullanılan yöntemin aynıdır. Bu da boyutsuzluğun faydasını ortaya koymaktadır: metali düşünmenin en iyi yolu, fraktale benzer bir model çerçevesinde, hepsi birbirinden farklı boylardaki kutuları gözünde canlandırmaktır.

Boyutsuzluk fikrinin gücünü ortaya koyabilmek için çok fazla matematiksel analize ve gerçek sistemler üzerinde birçok deneyler yapılmasına ihtiyaç vardı. Kadanoff zor bir işe kalkıştığını ve olağanüstü güzelliğe sahip, kendi kendine yeterli bir dünya yarattığını hissetmişti. Bu güzellik kısmen evrensel oluşundan kaynaklanıyordu. Kadanoff'un fikri kritik fenomenlerle, yani görünürde birbiriyle ilişkisi olmayan geçişlerle - sıvıların kaynaması, metallerin mıknatıslanması - ilgili olarak meydana gelen en çarpıcı olguyu destekler mahiyetteydi: hepsi aynı kurallara tabi oluyordu.

Bundan sonra Wilson, teorinin tamamını renormalizasyon grup teorisi başlığı altında bir araya getiren çalışmaları yaparak, gerçek sistemlerle ilgili olarak gerçek hesaplamaları yapabilmek üzere güçlü bir yöntem sağlamıştır. Renormalizasyon fizik alanına, 1940'lı yıllarda, kuantum teorisinin elekt-

ronlarla fotonların etkileşimini hesaplamayı mümkün kılan bir bölümü olarak girmiştir. Tıpkı Kadanoff ve Wilson'un kuşku duyduğu hesaplamalara ilişkin sorun gibi, bu tür hesaplamalara ilişkin bir sorun da, bazı kalemlerde, sanki miktarlar sonsuzmuş gibi işlem yapmanın gerekli görünmesiydi; bu da çok karışık ve sevimsiz bir işti. Sistemi Richard Feynman'ın, Julian Schwinger'in, Freeman Dyson'un ve diğer bazı fizikçilerin tasarladığı yöntemlere uyarak renormalize etmek sayesinde bu sonsuzluklardan kurtulmak mümkün olmuştur.

Çok daha sonraları, 1960'lı yıllarda, Wilson renormalizasyonun başarılı olmasını sağlayan temelleri bulmuştur. O da Kadanoff gibi boyutsuzluk ilkelerini düşünmüştür. Bazı miktarların, mesela bir parçacığın kütlesinin, hep sabit olduğu düşünülmüştür - tıpkı günlük yaşantıdaki herhangi bir nesnenin kütlesinin sabit alınışı gibi. Kestirme yoldan yapılan renormalizasyonun başarısı, kütle gibi bir miktarın hiç sabit bir değeri yokmuş gibi davranmasından kaynaklanıyordu. Bu tür miktarlar, hangi ölçekten bakılıyorsa ona bağlı olarak yukarı veya aşağı dalgalanıyorlardı. Bu da saçma görünmekteydi. Oysa bu işlem Benoit Mandelbrot'un geometrik şekiller ve İngiltere'nin sahilleri ile ilgili olarak ortaya koyduğu bulgularla tam bir benzerlik göstermekteydi. Bunların uzunluklarını ölçekten bağımsız olarak ölçmek mümkün değildi. Bir cins relativite çerçevesinde gözlemcinin durduğu yer, ister yakın ister uzakta olsun, ister plajda ister uzaydaki bir uyduda olsun, ölçüm işlemini etkiliyordu. Mandelbrot'un da gördüğü gibi, ölçekler arasındaki variyasyon keyfi değildi; kurallara riayet ediyordu. Standart kütle ya da uzunluk ölçülerindeki değişebilirlik, farklı bir cins miktarın sabit kaldığı anlamına geliyordu. Fraktallar bahis konusu olduğunda, bu miktar kesir boyut oluyordu - bu da hesaplanabilen ve daha başka hesaplamalarda araç olarak kullanabilen bir sabit değerdi. Kütlenin ölçeğe bağlı olarak değişmesini sağlamak demek, matematikçilerin ölçekleri aşan bir benzerliği teşhis edebilmesi demekti.

Böylece, zor bir hesaplama işine kalkışan Wilson'un renormalizasyon grup teorisi sonsuz derecedeki karmaşık problem-

lerin çözümlenmesi için değişik bazı ufuklar açtı. O zamana kadar ileri derecede nonlineer problemleri ele almanın tek yolu pertürbasyon teorisi adı verilen bir aletti. Hesaplama işleminde kolaylık sağlamak için, nonlineer problemin çözülebilir, lineer bir probleme yeterli ölçüde yakın - bir küçük pertürbasyon mesafesinde - olduğunu varsayarsınız. Lineer problemi çözersiniz ve kalan kısımla ilgili olarak birkaç küçük komplike hileye başvurur ve bunu Feynman grafiği adıyla bilinen grafiğe dönüştürürsünüz. Bilginin daha hassas ve doğru olmasını istiyorsanız bu can sıkıcı grafiklerden daha da fazla üretmeniz gerekir. Şansınız varsa yaptığınız hesaplamaların hepsi bir çözümde birleşmeye doğru yol alır. Ancak, bir problem özellikle ilgi çekici ise bu şanstan eser kalmaz. 1960'lı yıllardaki genç parçacık fizikçilerinin hepsi gibi Feigenbaum da, durmadan Feynman grafikleri çizdiğini fark etti. Feigenbaum da, kendisine öğretilenlerin etkisiyle pertürbasyon teorisinin sıkıcı, aydınlatmayan ve saçma sapan bir şey olduğu kanaatini taşıyordu. Bu yüzden Wilson'un yeni renormalizasyon grup teorisinden çok hoşlandı. Kendi kendine benzerliği kabul eden bu teori, her seferinde bir katman kaldırarak karmaşlığı çökertmenin bir yolunu gösteriyordu.

Uygulamada, renormalizasyon grubu da aslında henüz doğrulanmamış durumdaydı. Kendi kendine benzerliği yakalayabilmek üzere, doğru hesaplamaların seçilmesi bayağı bir maharet gerektiriyordu. Bununla birlikte, renormalizasyon grubu, Feigenbaum da dahil, bazı fizikçilere türbülans probleminde kullanılabileceği ilhamını verecek kadar iyi ve yeterince sık çalışmıştı. Kaldı ki, kendi kendine benzerlik, adeta türbülansın imzası gibiydi: çalkantı üstüne çalkantı, burgaç üzerine burgaç. Ancak türbülans eşiği - düzenli bir sistemin kaosa döndüğü o esrarengiz an - ne olacaktı? Renormalizasyon grubunun bu geçişle ilgili olarak herhangi bir çözüm yolu göstereceğine ilişkin hiçbir belirti görünmüyordu. Mesela, geçişin ölçek yasalarına riayet ettiği hakkında ortada hiçbir belirti yoktu.

Feigenbaum'un, M.I.T.'de doktora öğrencisi olduğu sıralarda yaşadığı bir tecrübe yıllarca hafızasından silinmemiştir.

Boston'da arkadaşlarıyla birlikte Lincoln Reservoir'ın etrafında yürüyüşe çıkmışlardı. Feigenbaum, günde dört, beş saatlik yürüyüşler yapma alışkanlığını edinmişti; bu sırada zihninden geçen izlenimleri ve fikirleri bir düzene koymak fırsatını buluyordu. O gün de, gruptaki arkadaşlarından ayrılmış ve yalnız yürümeye başlamıştı. Piknik yapan bazı kimselerin yanından geçmiş ve onlardan biraz uzaklaşmıştı ki, onların seslerini duyarak, ellerinin hareket ettiğini ya da yiyeceklere uzandığını seyrederek ikide bir geriye dönüp bakıyordu. Birdenbire seyrettiği bu tablonun anlaşılmazlık doğrultusunda bir eşiği aştığını fark etti. Tablodaki resimler ne oldukları anlaşılamayacak kadar küçülmüştü. Hareketlerin birbiriyle irtibatsız, keyfi, gelişigüzel bir görünümü vardı. Kulağına hafifçe gelebilen seslerin ise hiçbir anlamı kalmamıştı.

Ebedi hareket[7] *ve hayatın anlaşılmaz telâşı.* Feigenbaum, Gustav Mahler'in İkinci Senfonisinin üçüncü muvmanında yakalamaya çalıştığı bir duyguyu tanımlarken söylediği bu sözleri hatırladı. *Tıpkı, gayet parlak ışıklarla aydınlatılmış bir balo salonunda danseden kişilerin hareketlerine sizin dışardan karanlıkta durduğunuz yerden bakmanız ve durduğunuz yerin, müziği bile duymayacağınız kadar uzakta olması gibi . . . Hayat size anlamsız görünebilir.* Feigenbaum Mahler dinleyip Goethe okuyor, bu Romantik çağ sanatçılarının ileri derecede romantik yaklaşımlarına dalıp kendini unutuyordu. Kuşkusuz, en çok beğendiği eser Goethe'nin *Faust*'uydu; bu eserin dünyaya ilişkin en ihtiraslı düşünceleri en entelektüel düşüncelerle bir araya getiren yaklaşımı, Feigenbaum'u adeta bununla özdeşleşme derecesinde etkilemişti. Bu romantik eğilimleri olmasa, aklını karıştıran duyguyu kolayca içinden tamamen çıkarıp atabilirdi. Kaldı ki, insanlara daha uzak mesafeden bakıldığında bu fenomenler neden anlamlarını kaybetmiyorlardı? Fiziğin yasaları insanların küçülmesi konusunda basma kalıp bir açıklama getiriyordu. Ancak, daha derin düşününce, küçülme ve anlam kaybetme olayları arasındaki irtibat pek açık ve seçik değildi. Nesneler küçüldükçe ne diye anlaşılamaz hale gelsinlerdi?

Bu tecrübeyi ciddi ciddi, teorik fiziğin kullandığı araçlarla analiz etmeye çalıştı; bunu yaparken beynin algılama mekanizması düzeyindeki etkileri de sorgulamaktan geri kalmıyordu. İnsanların birbirleri üzerinde icra ettikleri bazı etkileri görürsünüz ve bunlardan birtakım sonuçlar çıkarırsınız. Duyularınızın elde edebileceği enformasyonun ne muazzam miktarlara ulaşacağını düşünün; enformasyonu dekode eden cihazınız bunları nasıl ayıklar? Açıkça - ya da oldukça açıkça - bilindiğine göre, insan beyninde dünyadaki bütün her şeyin direkt kopyaları mevcut değildir. Algılanan resimleri karşılaştırabileceğimiz bir şekiller ya da fikirler kütüphanesi yoktur. Enformasyon gayet esnek bir biçimde depolanmakta; fantastik bitiştirmeler ve hayali sıçramalara başvurmayı mümkün kılmaktadır. Orada bir miktar kaos vardır, beyin de kendi içindeki düzene erişebilmek için klasik fizikten daha fazla esnekliğe sahip gibi görünmektedir.

Feigenbaum aynı zamanda renkleri de düşünmekteydi. On dokuzuncu yüzyılın ilk yıllarında bilimde küçük çapta bir tartışmaya neden olan konu, rengin doğasına ilişkin olarak Newton'un İngiltere'deki izleyicileri ile Almanya'da Goethe arasında doğan görüş ayrılığı idi. Newton fiziğine göre, Goethe'nin fikirleri bilimsel görüş izlenimi veren dolambaçlı iddialardan başka bir şey değildi. Goethe rengin, spektrometre ile ölçülecek ve bir kelebek gibi kanatlarından kartona tutturulacak statik bir miktar olduğu iddiasını kabul etmiyordu. Rengin bir algılama işi olduğunu iddia etdiyordu. "Hafif ağırlık ve karşı ağırlık sayesinde, Doğa kendisine tayin edilen sınırlar dahilinde salınım yapar,"[8] diye yazmıştı, "oysa, uzay ve zaman içinde bize sunulmuş bulunan fenomenlerin çeşitleri ve şartları hep böyle doğmaktadır."

Newton teorisinin mihenk taşı bir prizmayla yaptığı meşhur deneydir. Prizma beyaz ışık huzmesini gökkuşağı renklerine ayırarak görülebilen bütün tayfa yayar; Newton da bu katışıksız renklerin beyazı elde etmek için birbirine eklenmesi gereken temel öğeler olduğunu fark etmişti. Bunun üzerine, biraz da sağduyusunun yardımıyla, renklerin frekanslara tekabül ettiğini önerdi. Titreşen bazı cisimlerin -

eski deyimiyle zerrelerin - titreşimlerin hızıyla orantılı olarak renkleri meydana getirmesi gerektiğini düşünuyordu. Bu yaklaşımı destekleyen pek az kanıt olduğunu nazarı itibara alırsak, bu kadar parlak bir buluşun ne kadar zayıf bir gerekçeye dayandığını kabul etmemiz gerekir. *Kırmızı* nedir? Bir fizikçiye sorarsanız, bir metrenin 620 ila 800 milyarda biri boyundaki dalgalarla yayılan bir ışık olduğunu söyleyecektir. Newton optiğinin binlerce kez doğrulanmış olmasına karşılık Goethe'nin renkler konusundaki incelemesi gömüldüğü karanlığın şefkatli bağrında kayboldu.. Feigenbaum Goethe'nin incelemesini aramaya gittiğinde, Harvard kütüphanesindeki tek nüshanın da ortadan yok olduğunu gördü.

Nihayet eline bir kopyasını geçirdiğinde, Goethe'nin aslında, renkleri araştırırken akıl almayacak kadar çok deneyler gerçekleştirdiğini anladı. Goethe de Newton gibi işe bir prizma ile başlamıştı. Newton prizmayı bir ışığın önüne tutarak bölünen ışını beyaz bir yüzeyin üstüne düşürmüştü. Goethe ise prizmayı gözüne tutmuş ve prizmadan bakmıştı. Böyle olunca da hiç renk görmemişti; ne bir gök kuşağı tayfına ne de tek bir renge rastlamıştı. Berrak bir beyaz yüzeye ya da berrak bir mavi göğe prizmayla bakınca gene aynı sonuç elde edilmektedir: tek düzelik.

Küçücük bir leke beyaz yüzeyin berraklığını keserse ya da gökte bir bulut görünürse, birdenbire bir renk demeti görüyordu. Goethe bunun üzerine "ışık ve gölgenin ardışıklığı" olayının rengi meydana getirdiği sonucuna vardı. Bunun arkasından, çeşitli renkli ışık kaynaklarının düşürdüğü gölgeleri insanların nasıl algıladığını araştırmaya girişti. Yaptığı çeşitli deneylerde mumlar, kurşun kalemler, aynalar ve renkli camlar, ay ışığı ve güneş ışığı, kristaller, sıvılar ve renk çarkı kullandı. Mesela, şafak vakti beyaz bir kâğıt parçasının önünde bir mum yakmış ve bir kurşun kalemi dik vaziyette tutmuştu. Mum ışığındaki gölge parlak mavi görünümlüdür. Neden? Beyaz kâğıt tek başına, ister gün batarken bakın, ister akşam karanlığında mumun sıcak ışığını ilave ederek bakın, gene de beyaz olarak algılanır. Bir gölge nasıl olur da beyazı, biri mavi bölge diğeri de kırmızı-sarımsı bölge olmak üzere

ikiye böler? Goethe bunun üzerine şu öneriyi öne sürdü: Renk "karanlığın gölgeye bağlanmış bir derecesidir." Her şeyden öteye, daha çağdaş bir dille ifade edersek, renk sınır koşullarından ve eşsizlik özelliğinden kaynaklanmaktadır.

Newton'u redüksiyonist olarak tanımlarsak Goethe'ye de holistik* diyebiliriz. Newton ışığı parçalarına ayırmış ve renk için en temel fiziksel açıklamayı bulmuştu. Goethe çiçek bahçesinde dolaşmış, tabloları incelemiş, büyük kapsamlı, 'efradını câmi' bir açıklama aramıştır. Newton renk teorisini, fiziğin bütün alanı bakımından matematik bir şemaya oturacak şekilde düzenlemişti. Goethe ise iyi mi olmuş kötü mü olmuş bilinmez, matematikten nefret ediyordu.

Feigenbaum Goethe'nin renk konusunda haklı olduğuna inanmıştı. Goethe'nin fikirleri psikologların çok iyi tanıdığı yüzeysel bir kavramla benzerlikler taşıyordu; Goethe, fiziğin katı gerçekliği ile bu gerçekliği algılamanın sübjektifliği dolayısıyla insandan insana değişebilir olması arasında bir fark olduğunu ortaya koymuştu. Bizim algıladığımız renkler zamandan zamana ve insandan insana değişmektedir; bunu söylemenin yanlış bir tarafı yoktur. Fakat Feigenbaum'un anladığı şekliyle, Goethe'nin fikirleri göründüğünden daha bilimsel bir nitelik taşıyordu. Hem derinliği olan hem de ampirik fikirlerdi. Goethe deneylerinin tekrarlanabilirliğini tekrar tekrar vurgulamıştı. Goethe'ye göre renk konusunda evrensel ve objektif olan şey rengin algılanmasından ibaretti. Kırmızı rengin gerçek dünyaya ait tanımlanabilir bir niteliğe sahip olduğunu, bizim algılayışımızdan bağımsız olarak, hangi bilimsel kanıtlara dayanarak ispatlayabilirdiniz ki?

Bu durumda, Feigenbaum insanların algılarının, özellikle deney furyasının karmakarışıklığını ayıklayıp evrensel nitelikleri keşfeden algıların hangi matematik formüllerle ifade edilebileceği konusunu düşünmeye başladı. Newtoncuların öne sürdüğü gibi, kırmızı, mutlaka ışığın özel bir dalga genliği demek değildir. Bu kaos evreninin öyle bir bölgesidir ki,

*Bir sistemin içindeki parçaların ve o parçalar arasındaki organizasyonun üzerinde, sistemin kendine özgü özellikleri de olduğu doktrinini benimseyen bir düşünce. (ç.n.)

bu bölgenin sınırları kolay kolay betimlenemez - oysa zihnimize göre, kırmızı düzenli ve doğrulanabilir bir tutarlılık içinde bulunmaktadır. Bütün bunlar, akışkanlardaki türbülans gibi problemlerin çok uzağında gibi görünen genç bir fizikçinin düşünceleriydi. Gene de, algı kaosu içinde, insan zihninin aradığı şeyleri nasıl bulup çıkardığını anlayabilmek için, insanın önce, düzensizlikten nasıl olup da evrensellik çıktığını anlaması gerekir.

Feigenbaum Los Alamos'te nonlineerlik sorunu üzerinde düşünmeye başladığında, bütün öğrenimi boyunca, kendisine bu konuyu çözmesine yardımcı olacak hiçbir şey öğretilmemiş olduğunun bilincine vardı. Nonlineer bir diferansiyel denklemler sistemini çözmek mümkün değildi; ders kitaplarında özel olarak oluşturulmuş örneklerin de hiçbir faydası yoktu. Pertürbasyon tekniğini kullanmak, yani gerçek bir problemin yakınlarında bir yerde bulunduğu ümit edilen çözülebilir bir problem üzerinde devamlı düzeltmeler yaparak ilerleme yöntemi de ona saçmalık gibi geliyordu. Hesap işlemlerinde kullandığı malzeme sadece kurşun kalem ve kâğıttan ibaret olduğu için, Feigenbaum, işe, Robert May'ın popülasyonlar biyolojisi bağlamında incelemiş olduğu basit denklemin bir benzeri ile başlamaya karar verdi.

Bu denklem, lise öğrencilerinin geometri dersinde parabol çizmek için kullandıkları denklemin aynı idi. Denklem şöyle yazılabiliyordu: $y=r(x - x^2)$. Bu denklemde x' e verilen her değerin y için bir karşılığı vardır; bunun sonucunda ortaya çıkan eğri iki sayının alabileceği bütün değerlerin arasındaki ilişkiyi ifade eder. Eğer x (bu yılın nüfusu) küçükse, y de (gelecek yılın nüfusu) küçüktür, fakat x' ten daha büyüktür; bu durumda eğri dik olarak yükselir. Eğer x değerler yelpazesinin ortalarında ise y büyüktür. Parabol bir maksimum değerine yükselir, sonra da düşer, öyle ki x büyükse, y tekrar küçük olacaktır. Ekolojik modellemelerde, nüfus çöküşlerine muadil durumlar, gerçekdışı ve sınırlanmamış artışı önleyerek, bu denklemle meydana getirilmektedir.

Önce May, sonra da Feigenbaum için sorun, bu basit hesap işlemini sadece bir kez kullanmak değil, bir feedback

sarmalı olarak sonsuz sayıda tekrarlamaktı. Bir hesap işleminin çıktısı bir sonraki işlemin girdisi olarak kullanılıyordu. Neler olup bittiğini bir grafikle görmek istediğinizde, parabolun çok yararı olmuştur. x ekseni üzerinde bir başlangıç değeri seçin. Bu noktadan yukarı, parabolla kesiştiği noktaya kadar bir doğru çizin. Ortaya çıkan değeri y ekseninde okuyun. Yeni değeri kullanarak yeni baştan başlayın. Arka arkaya gelen noktalar önce parabol üzerinde bir yerden başka yere zıplamakta, sonra da istikrarlı bir denge noktasında, x ve y'nin eşit olduğu ve böylece değerin değişmediği bir yerde karar kılmaktadır.

Yapılan işin esprisine bakılırsa, standart fizikteki karmaşık hesaplamadan bu kadar uzak bir işlem daha olamaz. Problemin içinden labirent gibi bir kerede çıkmak yerine, problem tekrar tekrar yapılan basit bir hesaplama işlemiyle çözülüyordu. Sayısal deneyciler, tıpkı tüpün içinde kaynayan bir reaksiyonu gözlemleyen kimyacılar gibi, durumu seyrediyorlardı. Burada elde edilen çıktı bir sayı dizisinden ibaretti ve her zaman kararlı bir nihai durumda yakınsamaya yönelmiyordu. İki değer arasında ileri, geri salınarak son buluyordu. Yahut, May'ın popülasyon biyologlarına izah ettiği gibi, manzarayı seyreden oldukça, o da kaotik bir şekilde değişmeye devam edecekti. Birbirinden farklı davranış biçimi ihtimalleri arasındaki tercih kontrol parametresine bağlı idi.

Feigenbaum bir yandan bu sayısal işlemleri deney mahiyetinde yaparken, nonlineer fonksiyonları analiz etmek için daha klasik çareler de deniyordu. Ancak, bu denklemden çıkacak resmin tamamını bu yöntemlerle bile görmesi mümkün olamıyordu. Zaten ihtimaller o derece komplike idi ki, bu analizleri yapmanın müthiş zor olacağını görüyordu. Kaldı ki, Los Alamos'ta üç matematikçinin - Nicholas Metropolis, Paul Stein ve Myron Stein - 1971'de bu tür "dönüşümleri" incelediklerinden haberdardı; şimdi de, Paul Stein kendisine, karmaşıklığın gerçekten de ne kadar ürkütücü bir şey olduğunu hatırlatıp dikkatli olması için ikazda bulunuyordu. Bu en basit denklemin bile çözülemeyeceği anlaşılmış ol-

duğuna göre, bilim adamlarının *gerçek* sistemler için kaydedeceği çok daha komplike sistemlerin akibeti ne olacaktı? Feigenbaum problemi olduğu gibi rafa kaldırdı.

Masum görünüşlü bu denklem,[9] kaosun kısa tarihinde, çeşitli bilim dallarındaki bilim adamlarının bir probleme çok farklı açılardan nasıl baktıklarının çok veciz bir örneğini teşkil eder. Biyologlara bakılırsa bu denklemin şöyle bir mesajı vardı: Basit sistemlerden komplike sonuçlar çıkabilir. Metropolis, Stein ve Stein'e[10] bakılırsa problemin aslı, hiçbir sayısal değeri nazarı itibara almadan, topolojik paternlerden oluşan bir koleksiyonun kataloğunu çıkarmaktı. Bunlar, feedback sürecine özel bir noktadan başlıyor ve birbirinin peşi sıra gelen değerlerin parabol üzerinde bir yerden başka bir yere sıçramalarını seyrediyorlardı. Değerler sağa veya sola doğru hareket ettikçe, R'lerin (sağ) ve L'lerin (sol) ardışık dizilerini kaydettiler. Bir sayılı patern: R. İki sayılı patern: RLR. 193 sayılı patern: RLLLLLRRLL. Matematikçi gözüyle bakıldığında bu ardışık dizilerin ilginç bazı özellikleri olduğu görülüyordu - hep aynı özel düzen içinde tekrarlandıkları izlenimini veriyorlardı. Fakat fizikçi gözünde, karanlık ve can sıkıcı dizilerdi.

O zamanlar kimse farkında değildi, ama Lorenz 1964 yılında aynı denklemi, iklime ilişkin önemli bir sorunla benzerliği dolayısıyla ele alıp incelemişti. Sorun o kadar önemliydi ki, o güne kadar kimsenin aklına bu soruyu sormak gelmemişti: *İklim diye bir şey var mıdır*?[11] Yani, Yeryüzünün havasının uzun süreli bir ortalama değeri var mıdır? Meteorologların birçoğu, o gün bugün, cevabı peşinen olumlu kabul etmişlerdir. Şüphesiz ki, ölçülebilen her davranış biçiminin, nasıl dalgalanırsa dalgalansın, ortalama bir değeri olmak zorundadır. Oysa üstünde biraz düşününce, meselenin o kadar açık ve seçik olmadığı görülmektedir. Lorenz'in de işaret ettiği gibi, geçen 12.000 yıl boyunca havanın ortalama değerleri bundan önceki 12.000 yıl boyunca, Kuzey Amerika'nın çoğunluğu buzlarla kaplı olduğu çağlarda var olan değerlerden gözle görülür derecede farklı olmuştur. Acaba bir iklim vardı da, fiziksel bir nedenle değişip başka bir iklim

haline mi geldi? Yoksa bunlardan daha uzun süreli bir iklim var da, onun içindeki bu devirler sadece dalgalanmalardan mı ibarettir? Ya da meteoroloji gibi bir sistemin ortalama bir değerde birleşmesi asla mümkün değil midir?

Lorenz ikinci bir soru daha sormuştur. Hava durumuna hükmeden denklemler dizisini tam olarak gerçekten kaydettiğinizi farzedin. Başka bir ifadeyle, Tanrı'nın şifre kitabının elinize geçtiğini farzedin. O takdirde, ortalama sıcaklık ya da yağış istatistiklerini hesaplamak için bu denklemleri kullanır mıydınız? Eğer denklemler lineer olsaydı, bu sorunun cevabı kolay bir evet olurdu. Ama denklemler nonlineerdir. Tanrı asıl denklemleri bizlere vermediğine göre, Lorenz'e bunların yerine, ikinci dereceden fark denklemini incelemek kalıyordu.

Lorenz de, aynı May'ın yaptığı gibi, önce, belirli parametre değerleri verilip denklem tekrar çalıştırıldığında neler olduğunu inceledi. Parametre değerleri düşük iken denklemin istikrarlı bir sabit noktaya ulaştığını gördü. Tabii ki, o noktada, sistem kelimenin en basit anlamıyla bir "iklim" oluşturuyordu - "hava durumu" hiçbir değişikliğe uğramamıştı. Parametre değerleri yükselince iki nokta arasında salınım başlaması ihtimali doğuyordu; sistem, orada da tek bir ortalama değerde birleşmeye yönelmişti. Lorenz, belirli bir noktadan sonra, kaosun meydana çıktığını gördü. Lorenz'in aklında iklim olduğu için, devamlı feedbackin periyodik bir davranış biçimi yaratıp yaratmayacağını sorgulamakla yetinmedi ve ortalama çıktının ne olacağı sorusu üzerinde de durdu. Ortalama değerin de istikrarsız bir şekilde dalgalandığı cevabıyla karşılaştı ve bu sonucu kabullendi. Parametrenin değerinde hafif bir değişiklik olduğunda, ortalama değer hissedilir derecede değişebiliyordu. Lorenz, bundan kıyas yoluyla, Yerin ikliminin hiçbir zaman, uzun süreli ortalama davranış biçimine sahip güvenilir bir denge pozisyonunda karar kılmayacağı sonucunu çıkardı.

Lorenz iklim üzerindeki çalışmasını matematik alanı çerçevesindeki bir makalede yayınlamış olsa tam bir fiyasko ile sonuçlanırdı - aksiyomatik anlamda hiçbir şey kanıtlamıyor-

du. Fizik çerçevesindeki bir makale olarak da ciddi yetersizlikleri vardı, çünkü Yerin iklimi hakkında birtakım sonuçlar çıkarabilmek için bu kadar basit bir denklem kullanmanın izah edilir tarafı yoktu. Buna rağmen, Lorenz ne dediğinin farkındaydı. "Makalenin yazarı bu benzerliğin sadece bir tesadüf olmadığının; bunun aksine, fark denkleminin, bir akış rejiminden başka bir akış rejimine geçişlerdeki, daha doğrusu, istikrarsızlık olgusunun tümündeki fiziksel mekanizmayı olmasa bile, matematiksel mekanizmanın büyük çoğunluğunu kapsadığının bilincindedir." İsveç'te yayınlanan *Tellus* adlı bir meteoroloji dergisinde ortaya atılan böyle cüretkâr bir iddianın temelinde ne gibi bir sezginin bulunduğunu aradan yirmi yıl geçtikten sonra bile, hiç kimse anlayabilmiş değildi. (Fizikçinin biri yüzünü buruşturup "*Tellus mu*?" demişti, "*Tellus*'u kim okur ki!") Lorenz kaotik sistemlere özgü ihtimalleri gittikçe daha derinliğine girerek anlıyordu - fakat bu derinliği meteoroloji diliyle ifade edemezdi.

Lorenz, dinamik sistemlerin değiştirdiği maskeleri araştırmaya devam ettikçe, ikinci dereceden dönüşümden biraz daha komplike olan sistemlerin başka türden beklenmedik şekiller meydana getirebildiğinin farkına vardı. Belirli bir sistemin içinde gizlenmiş vaziyette, birden fazla istikrarlı çözüm yolu bulunabiliyordu. Gözlemci uzun bir süre zarfında bir tek davranış biçimi görebiliyordu; oysa aynı sistemde bundan tamamen farklı bir davranış biçimi bulunması da gayet doğaldı. Böyle bir sisteme geçişsiz sistem denir. Geçişsiz sistem ya bir denge durumunda ya da başka bir denge durumunda kalabilir, iki durumda birden kalamaz. Ancak dışardan gelen bir itiş, onu durumunu değiştirmeye zorlayabilir. En basit ifadeyle, standart bir sarkaçlı saat geçişsiz bir sistemdir. Düzgün enerji akışı, bir maşa mekanizması aracılığıyla kurulu bir yaydan ya da pilden sağlanır. Enerjinin düzgün akışı sürtünme sonucu kaybedilir. En belirgin denge durumu düzenli bir sallanma hareketidir. Birisi kazara saate dokunursa, sarkaç, bu ani darbe yüzünden ya hızlanacak ya da yavaşlayacak; fakat hızla kendi denge durumuna dönecektir. Saatte ikinci bir denge daha vardır - hareket denklemlerinin ikinci bir geçerli

çözümü - bu da sarkacın aşağıya sarkmış halde ve hareketsiz durduğu bir durumdur. Bundan daha basit bir geçişsiz sistem de bizzat iklim olabilir - hatta iklimde belki birbirinden aşırı derecede farklı davranış biçimlerine sahip olan birçok değişik ve belirgin bölgeler de vardır.

Yeryüzünün atmosferinin ve okyanuslarının uzun süreli davranış biçimini simüle etmek üzere global bilgisayar modelleri kullanan iklim bilimciler, modellerinde gözle görülür derecede farklı olan bir dengeye de yer verildiğini yıllardan beri bilirler. Yerin bütün jeolojik tarihi süresince, bu alternatif iklim hiçbir zaman var olmamıştır, fakat gene de yeryüzünü yöneten denklemler sistemi bakımından en az diğeri kadar geçerli bir çözüm yolu teşkil etmektedir. Bu bazı iklim bilimcilerin "Beyaz Yeryüzü" iklimi[12] dedikleri iklimdir: bu yeryüzünün kıtaları karla örtülü, okyanusları da buzlarla kaplıdır. Buz tabakalarıyla kaplı bir yeryüzü güneşten gelen radyasyonun yüzde yetmişini yansıtacak; bundan dolayı da aşırı derecede soğuk kalacaktır. Atmosferin en alttaki katmanı olan troposfer şimdiki halinden çok daha ince olacaktır. Yerin donuk yüzeyi üzerinde esecek fırtınalar bildiğimiz fırtınalardan çok daha zayıf olacaktır. Genelde, iklim, bildiğimiz şekliyle yaşam için çok daha az uygun olacaktır. Bilgisayar modelleri dönüp dolaşıp Beyaz Yeryüzü dengesine düşmeye o kadar yatkındırlar ki, iklim bilimciler bunun bir türlü gerçekleşmeyişinin sebebini merak ettiklerini fark edip şaşırırlar. Belki de olmayışı sırf bir tesadüftür.

Yeryüzünün iklimini buzullu bir duruma doğru itmek için dış kökenli bir kaynaktan muazzam bir darbe gelmesi gerekir. Buna karşılık, Lorenz akla yakın gelen başka bir davranış biçimi de betimlemiştir; buna "hemen hemen geçişsizlik" denmektedir. 'Hemen hemen geçişsiz' bir sistem çok uzun bir süre boyunca, belirli sınırlar içinde dalgalanan ortalama bir davranış biçimi türü sergilemektedir. Sonra, hiçbir sebep olmaksızın, bambaşka bir davranış biçimine geçmekte ve hâlâ dalgalanmaya devam etmekte birlikte farklı bir ortalama değer üretmektedir. Bilgisayar modelleri tasarımı yapan kimseler Lorenz'in keşfinden haberdardır, ancak, 'hemen

hemen geçişsizlik' olayından kaçmak için ellerinden geleni artlarına koymazlar. Çünkü aşırı derecede öngörülmezliği vardır. Programcıların doğal yaklaşımları uyarınca kurdukları modeller, gerçek gezegenimizin üzerinde her gün ölçümünü yaptığımız dengeye dönebilmek için güçlü bir eğilimi olan modellerdir. Sonra da, iklimdeki büyük değişmeleri izah edebilmek için, dış etkenleri - mesela dünyanın güneşin etrafındaki yörüngesindeki değişmeleri - araştırırlar. Halbuki, Yerin ikliminin uzun süren Buzul Çağlarına esrarengiz, düzenli aralıklarla girip girip çıkmasının nedenlerinin, 'hemen hemen geçişsizlik' olgusuyla gayet kolayca açıklanabileceğini görmek için iklim bilimcilerin hayal güçlerini çok fazla çalıştırmalarına gerek yoktur. O takdirde, iklimlerdeki bu zamanlama için fiziksel nedenler aramaya lüzum kalmayacaktır. Buzul Çağları belki de kaostan kaynaklanan bir üründen başka bir şey değildir.

Otomatik silahların kullanıldığı bir çağda, silah koleksiyoncuları nasıl Colt.45'i nostaljik duygularla hatırlarsa çağdaş bilim adamları da, HP-65 cep hesap makineleri için aynı hasret dolu duyguları besler. Bu makine, piyasaya hâkim olduğu birkaç yıl zarfında, birçok bilim adamının çalışma alışkanlıklarının tamamen değişmesine sebep olmuştu. Feigenbaum için, kalem ve kâğıtla çalışma tarzı ile daha henüz tasarımı yapılmamış olan bilgisayarla çalışma tarzına geçiş arasındaki köprüyü temsil etmektedir.

Feigenbaum'un Lorenz'in kim olduğundan hiç haberi yoktu;[13] fakat 1975 yılının yaz aylarında Colorado Eyaletinin Aspen şehrinde yapılan bir toplantıda aynı ikinci dereceden fark denkleminin birtakım matematiksel niteliklerini anlatan Steve Smale'i dinledi. Smale, periyodik durumdan kaos durumuna geçişteki değişikliklerin oluştuğu tam o noktaya ilişkin olarak henüz cevapları bulunmamış bazı ilginç soruların var olduğu görüşündeydi. Her zamanki tavrıyla, Smale araştırılmaya değer sorunlara keskin bir içgüdüyle yaklaşmaktaydı. Feigenbaum bu konuyu bir kere daha incelemeye karar verdi. Dikkatini düzen ile kaos arasındaki sınır bölgesi üzerinde yoğunlaştırarak, bir ikinci dereceden fonksiyon

anlayışının parçalarını bir araya getirmek amacıyla, hesap makinesiyle analitik cebir ve sayısal araştırma karışımı bir yöntem kullanmaya başladı.

Feigenbaum, bu bölgenin bir akışkanın içindeki düzgün akış ile türbülans arasındaki esrarengiz sınıra benzediğini aklından - ama sadece aklından - geçirdi. Bu bölge, hayvan popülasyonlarındaki değişmelerde düzensiz devirler meydana gelmesi ihtimalini evvelce göz ardı etmiş bulunan popülasyon biyologlarını ikaz edip dikkatlerini çeken Robert May'ın işaret ettiği aynı bölge idi. Bu bölgede kaos doğrultusunda yol almak demek, periyotların iki kat arttığı, iki devrin dört devre, dört devrin sekiz devre vbg. bölündüğü bir çağlayana doğru ilerlemek demekti. Bu bölünmeler sonucu ortaya büyüleyici bir şekil çıkıyordu. Mesela, *doğurganlık* bakımından küçük bir değişme bütün bir güve popülasyonunun dört yıllık bir devirden sekiz yıllık bir devre geçmesine neden olabiliyordu. Feigenbaum bu bölünmeleri meydana getiren parametre değerlerini tam olarak hesaplamaya başlamayı kararlaştırdı.

Sonunda, hesap makinesinin yavaşlığı yüzünden o Ağustos ayında bir keşif yapmak durumunda kaldı. Periyodun her ikiye katlanması için parametre değerini tam olarak hesaplamak asırlar - aslında, dakikalar - alıyordu. Diziyi takip edip tırmandıkça, işlemlerin süresi daha da uzuyordu. Elinde hızlı bir bilgisayarı ve yazıcı çıktısı olsa Feigenbaum'un hiçbir şekil görmesi mümkün olmayacaktı. Ancak, sayıları eliyle yazmak zorundaydı; sonra işlemin bitmesini beklerken gene sayıları düşünmek zorunda kalıyor; daha sonra da zamandan tasarruf etmek için, bir sonraki cevabın nerede çıkacağını tahmin etmesi gerekiyordu.

Halbuki bir anda, bu tahmini yapmasına hiç gerek olmadığını gördü. Bu sistemin içinde hiç umulmadık bir düzenlilik gizli durumda bulunuyordu: Bir perspektif resminde, birbiriyle özdeş telefon direklerinin oluşturduğu bir hattın ufukta yakınsaması gibi sayılar da geometrik olarak yakınsıyordu. Telefon direklerinden ikisini hangi boyda yapmanız gerektiğini biliyorsanız diğerlerinin hepsini de bilirsiniz;

ikinci direğin birinciye oranı ne ise üçüncü direğin ikinci direğe oranı da aynı olacak ve bu böylece devam edecektir. Periyotlar ikiye katlanırken gittikçe daha hızlanmakla kalmıyor, hızlanırken sabit bir oranı da muhafaza ediyordu.

Bunun niye böyle olması gerekiyordu? Normal olarak, geometrik birleşmenin mevcudiyeti, bir şeyin bir yerlerde değişik ölçeklerde kendi kendini tekrarladığına işaret ediyordu. Bu denklemin içinde belki bir boyutsuzluk paterni vardı ama bunu daha hiç gören kimse olmamıştı. Feigenbaum yakınsama oranını makinesinin müsaade ettiği en ince hassasiyetle - üç ondalık basamak - hesapladı ve sonuçta 4.669 sayısını buldu. Bulduğu bu oranın herhangi bir anlamı var mıydı? Feigenbaum sayılarla oynamayı seven herkesin yapacağı bir şeyi yaptı. Günün geri kalan saatlerini, bu sayının bütün standart sabit değerlere - (π), *e* vbg - uyup uymadığını araştırarak geçirdi. Elindeki oran bunların hiçbirinin varyantı değildi.

Tuhaftır, Robert May de bu geometrik yakınsamayı görmüş olduğunu daha sonraları hatırlamıştır.[14] Ancak, kaydeder kaydetmez unutmuştu. May'in ekolojiye bakış açısından, geometrik yakınsamanın sayısal özelliği dışında ilgi çeken hiçbir tarafı yoktu. İncelediği gerçek dünya sistemlerinde, hayvan popülasyonları sistemlerinde ve hatta ekonomik modellerde, önlenmesi imkânsız bir gürültü vardı ki mevcut bütün ince detayları bastırıyordu. Bu gürültüyü oraya kadar getirmiş bulunan darmadağınıklık, onun en hayati noktadan ileri geçmesini de önlemişti. May'i heyecanlandıran, denklemin kaba davranış biçimiydi. Sayısal ayrıntıların önem taşıyabileceğini hiç aklına getirmemişti.

Feigenbaum bulduğu şeyin öneminin farkındaydı, çünkü geometrik birleşme, bu denklemde bir şeylerin *boyutsuzlaştığına* işaret ediyordu; Feigenbaum da boyutsuzluğun önemli olduğunu biliyordu. Renormalizasyon teorisi tamamen boyutsuzluğa dayanıyordu. Dış görünüşü itibariyle düzenli olmayan bir sistemde, boyutsuzluk her şeyin değiştiği bir ortamda bazı niteliklerin muhafaza edildiği anlamına geliyordu. Denklemin türbülasyona kapılmış yüzeyinin altında be-

lirli bir düzenlilik yatıyordu. İyi de, nerede? Bundan sonra ne yapılması gerektiğini bilmek gerçekten zordu.

Los Alamos'un seyrelmiş havasında yazdan sonbahara hızla geçilir; Feigenbaum'u tuhaf bir düşünce aldığında neredeyse Ekim ayının da sonuna gelinmişti. Feigenbaum başka denklemlerle de uğraşan Metropolis, Stein ve Stein'in bazı paternlerin bir fonksiyon türünden başka bir fonksiyon türüne taşındığını bulduklarını biliyordu. R'lerin ve L'lerin aynı bileşimleri[15] ortaya çıkmış ve aynı sırayla görünmüşlerdi. Fonksiyonlardan biri, sayılardan birinin sinüsünü devreye soktu; bu sapma Feigenbaum'un parabol denklemine ilişkin olarak dikkatle oluşturmaya çalıştığı yaklaşımı konu ile ilgisiz hale getirdi. Her şeye yeni baştan başlaması gerekiyordu. Bunun üzerine HP-65'ini tekrar eline aldı ve $x_{t+1} = r \sin(\pi) x_t$ denklemi için periyotlardaki ikiye katlanmaları hesaplamaya başladı. Trigonometrik bir fonksiyonu hesaplamanın, makinenin çalışmasını çok daha yavaşlatması üzerine, Feigenbaum denklemin basitleştirilmiş bir şekliyle kestirmeden giderek işi daha çabuk bitirip bitiremeyeceğini düşündü. Gerçekten de, sayıları gözden geçirirken geometrik olarak yakınsadıklarını tekrar fark etti. Bunun üzerine iş, bu yeni denklem için yakınsama oranını hesaplamaya kalmıştı. Makinenin ayrıntı verme hassasiyeti sınırlıydı, fakat üç ondalık basamaklı bir sonuç elde etti: 4.669.

Aynı sayıyı bulmuştu. İnanılmaz bir şeydi: bu trigonometrik fonksiyon sadece tutarlı bir geometrik düzenliliği ortaya koymakla kalmıyordu. Çok daha basit bir fonksiyonun düzenliliği ile sayısal bakımdan özdeş bir düzenliliği ortaya koyuyordu. Birbirinden hem biçim hem de anlam bakımından bu kadar farklı iki denklemin aynı sonucu vermesinin ne bir matematiksel teoride ne de fiziksel bir teoride izahı yoktu.

Feigenbaum Paul Stein'i çağırdı. Stein bu kadar yetersiz kanıtlara dayanıp, bu rastlantıya inanmak konusunda kararsızdı. Kaldı ki, hassas bir hesaplama yapılmış değildi. Buna rağmen, Feigenbaum New Jersey'deki anne ve babası-

na da haber verip çok önemli bir buluş yaptığını bildirdi. Annesine, bu buluşun kendisini meşhur edeceğini söyledi. Ondan sonra da başka fonksiyonları denemeye başladı; düzensizlik doğrultusunda bir dallanma dizisi izlediğini düşündüğü ne kadar fonksiyon varsa hepsini denedi. Bütün fonksiyonlar sonuçta aynı sayıyı veriyordu.

Feigenbaum ömrü boyunca rakamlarla oynamıştı. Çoğu insan logaritma ve sinüs için tablolara bakarken, Feigenbaum daha çok genç olduğu zamanlarda bile bunların nasıl hesaplanacağını bilirdi. Fakat, cebinde taşıdığı hesap makinesinden daha büyük bir bilgisayar kullanmayı hiç öğrenmemişti - o da, fizikçi ve matematikçilere özgü bir duyguyla, bilgisayarla çalışmanın beraberinde getirdiği makineleşmiş düşünce tarzını hor görenler takımındandı. Ama, artık bunun zamanı gelmişti. Bir meslektaşından kendisine Fortran öğretmesini istedi; akşam olurken, çeşitli fonksiyonları deneyerek, sabit değerinin hesaplamasını beş ondalık basamağa, 4.66920'ye çıkarmıştı. Aynı gece, bilgisayarın el kitabında çift hassasiyet konusunu okuyan Feigenbaum ertesi gün, sayısını 4.6692016090'a kadar götürebildi - bu hassasiyet Stein'i ikna etmeye yeter de artardı bile. Buna rağmen, Feigenbaum kendisinin ikna olduğundan daha pek emin değildi. Düzenliliği aramak için yola koyulmuş - matematiği anlamak da zaten bu demektir - bu arada, bu tür özelliği olan denklemlerin, tıpkı fiziksel parçacık sistemleri gibi, kendilerine özgü karakteristik davranış biçimleri olduğunu da *bilerek* yola çıkmıştı. Nasıl olsa, bunlar basit denklemlerdi. Feigenbaum ikinci dereceden denklemleri anlamış, sinüs denklemlerini anlamıştı - matematiksel açıdan bunlar hiçbir özelliği olmayan basit şeylerdi. Oysa, bu birbirinden çok farklı ve değişik denklemlerin tam merkezinde durmadan tekrarlanan bir şey vardı ki, tek bir sayı yaratıyordu. Yepyeni bir şeyle karşılaşmıştı: belki sadece tuhaf bir rastlantıydı; belki de doğanın yeni bir yasası.

Farzedelim ki, prehistorik çağları inceleyen bir zoolog bazı şeylerin diğer bazı şeylerden daha ağır olduğuna - ağırlık adını verdiği soyut bir niteliğe sahip bulunduklarına - karar

veriyor ve bu düşüncesini bilimsel olarak araştırmak istiyor. Şimdiye kadar gerçekte ağırlığı hiç ölçmemiştir ama, bu kavram hakkında bir fikir sahibi olduğunu düşünmektedir. Büyük yılanlarla küçük yılanlara, büyük ayılarla küçük ayılara bakar ve bu hayvanların ağırlıkları ile boyları arasında bir ilişki olabileceği tahmininde bulunur. Bir terazi yapar ve yılanları tartmaya başlar. Hayretle bir bakar ki, her yılanın ağırlığı aynıdır. Şaşkınlık içindedir, ayıların ağırlığı da aynı yılanlar kadardır. Hepsi 4.6692016090 tartmaktadır. Demek ki, açıkçası, *ağırlık* onun aklındaki şey değildir. Kavramı tamamen yeniden gözden geçirmek gerekmektedir.

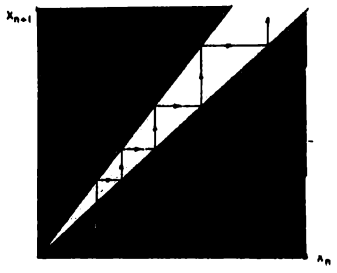
Yuvarlanarak akan nehir suları, sallanan sarkaçlar, elektronik salınıcılar - fiziksel sistemlerin birçoğu kaos doğrultusunda ilerlerken bir geçiş dönemi yaşamışlar; bu geçiş dönemlerinin çok karmaşık olması yüzünden gerekli analizleri yapmak pek kolay olmamıştı. Bunların hepsi, mekanizmaları çok iyi anlaşıldığı düşünülen sistemlerdi. Fizikçiler bunlar için geçerli olan bütün denklemleri biliyordu; oysa bu denklemleri bırakıp global, uzun süreli bir davranış biçimi yaklaşımına geçmek imkânsız gibi görünüyordu. Akışkanlara, hatta sarkaçlara ilişkin denklemler, maalesef, basit, tek boyutlu lojistik fonksiyonlardan çok daha zorlu çıkmıştı. Feigenbaum'un yaptığı buluş, bu denklemlerin herhangi bir faydası olmadığını gösteriyordu. Konu ile ilgili değillerdi. İkinci dereceden ya da trigonometrik olmaları da neticeyi değiştirmiyordu. Feigenbaum, "Fizikteki geleneksel anlayışa göre, siz mekanizmaları izole edersiniz; bunlan sonra geride ne kalıyorsa hepsi peşi sıra dökülür,"[16] diyordu. "Bu anlayış tamamen değişmektedir. Şimdi burada gerekli olan denklemleri biliyorsunuz fakat bunlar hiçbir işe yaramıyor. Mikroskopik düzeydeki bütün parçaları üstüne ilave edin; bunları da uzun süre devam ettiremeyeceğinizi göreceksiniz. Problemin çözümünde bunlar önem taşımamaktadır. Bir şeyi *bilmek* denen şeyin anlamı bununla tamamen değişmektedir."

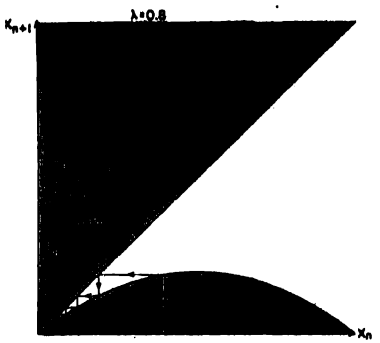
Sayılarla fizik arasındaki bağlantı biraz belirsiz olmakla birlikte, Feigenbaum, karmaşık nonlineer problemleri hesaplamak için yeni bir yöntem geliştirmesi gerektiğini kanıtlamış

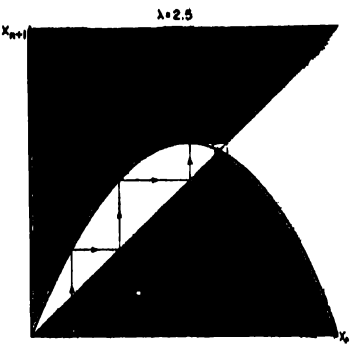
oluyordu. O zamana kadar, elde mevcut olan bütün yöntemler fonksiyonların ayrıntılarına bağımlı olmuştu. Bu fonksiyon bir sinüs fonksiyonu ise Feigenbaum'un büyük bir titizlikle geliştirdiği hesaplar da sinus hesapları oluyordu. Feigenbaum'un evrensellik buluşu, bütün bu yöntemlerin terkedilmesi gerekeceğini ifade ediyordu. Düzenliliğin sinüslerle hiçbir ilişkisi yoktu. Parabollarla da hiçbir ilişkisi yoktu. Şu veya bu fonksiyonla da hiçbir ilişkisi yoktu. Peki neden? İnsanda cesaret kalmıyordu. Doğa perdesini bir an için kaldırmış ve hiç umulmadık bir düzenden bir enstantane göstermişti. Bu perdenin arkasında acaba daha başka neler vardı?

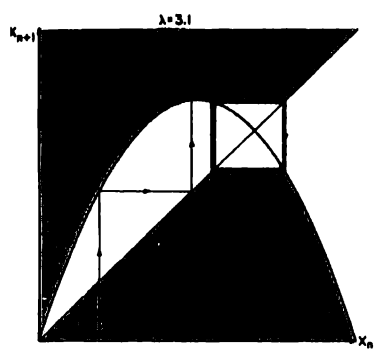
İlham geldiğinde, bir resim şeklinde geliyordu; dalgalı iki küçük ve bir de büyük şekilden oluşan bir resim zihinde oluşuyordu. Hepsi bu kadardı - sanki zihnine kazınmış parlak, keskin hatları olan bir resim olarak belki de, bilincin altıyla üstünü ayıran su hattının hemen altında yer alan muazzam bir aysberge benzetebileceğiniz düşünme sürecinin görünen kısmı kadar bir şeydi. Konu boyutsuzluk ile yakından ilgiliydi; Feigenbaum'u da tutması gereken yola koyuyordu.

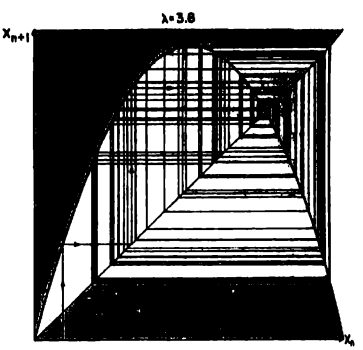
Feigenbaum çekicileri incelemekteydi. Kendi ürettiği fonksiyonlar sayesinde eriştiği kararlı denge öyle bir sabit noktadır ki diğer bütün noktaları çeker - başlangıçtaki "nüfus"un ne olduğuna bakılmaksızın, düzenli bir şekilde çekiciye doğru sıçrayarak yaklaşacaktır. Sonra, periyodun ilk ikiye katlanışında, çekici, tıpkı bölünen bir hücre gibi, ikiye ayrılacaktır. İlk başta, bu iki nokta pratik olarak beraberdir; sonra, parametrenin değeri yükseldikçe, yüzerek birbirlerinden ayrılırlar. Bundan sonra, periyot bir kez daha ikiye katlanır: Çekicinin her noktası aynı anda tekrar bölünür. Feigenbaum'un sayısı periyodun *ne zaman* ikiye katlanacağını öngörmesini sağlıyordu. Şimdi de, gittikçe daha komplike hale gelen bu çekici üzerindeki her noktanın kesin değerlerini de öngörebildiğini keşfetti - iki nokta, dört nokta, sekiz nokta . . . . Yıllık salınımlarda erişilen gerçek nüfusu artık söyleyebilecek durumdaydı. Oysa bir geometrik yakınsama daha vardı. Bu sayılar da boyutsuzluk yasasına riayet ediyordu.


x_{n+1}
x_n


λ=0.8
x_{n+1}
x_n


λ=2.5
x_{n+1}
x_n


λ=3.1
x_{n+1}
x_n


λ=3.8
x_{n+1}
x_n

KAOS İSTİKAMETİNDE SIFIR NOKTASINDA BİRLEŞMEK. Defalarca tekrarlanan basit bir denklem : Mitchell Feigenbaum bütün dikkatini basit fonksiyonlar üzerinde toplamış, bir sayıyı girdi olarak almış, bir başka sayı üreterek bunu çıktı olarak kullanmıştır. Hayvan gruplarında, bu yılın popülasyonu ile gelecek yılın popülasyon arasındaki ilişki bir fonksiyonla gösterilebilir.

Bu tür fonksiyonları gözünüzde canlandırmanın bir yolu bir grafik haline getirerek, girdileri yatay eksende, çıktıları da dikey eksende işaretlemektir. Muhtemel her girdi, (x) için, sadece bir tek çıktı (y) vardır ve bunlar kalın bir çizgiyle gösterilen bir şekil meydana getirirler.

Sonra, sistemin uzun süreli davranış biçimini göstermek için Feigenbaum rasgele bir (x) değeriyle başlayan bir güzergâh çizmiştir. Her (y) aynı fonksiyona yeni bir girdi olarak yeniden dahil edileceği için, şematik bir kestirme yoldan gidebilmiştir: Güzergâh 45 derece eğimli doğrudan - (x)'in (y)'ye eşit olduğu doğrudan - yukarı sıçramıştır.

Bir ekoloji uzmanına göre, nüfus artışı için en açık ve seçik fonksiyon türü lineer bir fonksiyondur - Malthus'un düzenli, sınırsız, her yıl sabit bir yüzde ile artan nüfus senaryosu bunun örneğidir (solda). Daha gerçekçi fonksiyonlar bir yay meydana getirir; bunlarda nüfus düzeyi çok yükseldiği zaman tekrar aşağı çekilir. Resimde bunun "lojistik haritası" olarak görülen kusursuz parabol, y=rx (1 - x) denklemiyle tanımlanır; burada (r)'nin değeri 0 ile 4 arasında olup parabolun eğimini belirlemektedir. Oysa Feigenbaum ne tür bir yay kullandığının aslında o kadar önem taşımadığını keşfetmişti; denklemin ayrıntıları ikinci planda kalıyordu. Önemli olan şey, fonksiyonun bir "kambur"u olması gerektiğiydi.

Buna rağmen, davranış biçimi hassas olarak parabolun eğimine - nonlineerlik derecesine ya da Robert May'ın tanımıyla "patlama ve aşırı nüfus"a bağlıydı. Fonksiyon çok yatıksa nüfus yok oluyordu: Başlangıçtaki nüfus ne kadar olursa olsun sonunda (0)'a düşüyordu. Eğimi arttırmakla klasik bir çevrecinin öngördüğü kararlı denge gerçekleşiyordu; bütün güzergâhları kendine doğru çeken bu nokta tek boyutlu bir "çekici" idi.

Belirli bir noktanın ötesinde, bir çatallaşma iki periyodunda salınan bir nüfus vermiştir. Bundan sonra daha çok periyot ikiye katlanmış ve sonunda (sağda altta) güzergâh kararlı duruma geçmeyi tamamen reddetmiştir.

Bu tür resimler Feigenbaum'a bir teori kurmak istediği zaman tam bir çıkış noktası olmuştur. Feigenbaum düşüncesini rekürsiyon üzerine bina etmeye başlamıştır: Fonksiyonların fonksiyonları, fonksiyonların fonksiyonlarının fonksiyonları ve bu böylece devam eder; iki kamburlu haritalar, sonra dört kamburlular . . . .

Feigenbaum matematikle fizik arasında unutulup kalmış bir alanı keşfetme gayretindeydi. Yaptığı çalışmayı belirli bir tasnife dahil etmek çok zordu. Matematiğe girmiyordu: hiçbir şeyi *ispat* etmiş olmuyordu. Evet, sayıları inceliyordu ama, torbalar dolusu bozuk para yatırım bankacısına ne ifade ediyorsa sayılar da matematikçiye aynı şeyi ifade eder: mesleği için gerekli olan malzemeyle aynı adı taşır, ancak

fazla değeri yoktur; üzerinde vakit israf etmeye değemeyecek kadar da özel bir şeydir. Matematikçinin asıl para birimi fikirlerdir. Feigenbaum fizik alanına giren bir programı yürütüyordu ve garip görünmektedir ama, yaptığı işe neredeyse uygulamalı fizik de diyebilirdiniz.

Feigenbaum'un incelediği konular, mezonlar ve kuarklar yerine, sayılar ve fonksiyonlardı. Bunların güzergâhları ve yörüngeleri vardı. Bunların davranış biçimlerini sorgulaması gerekiyordu. Daha sonraları bu yeni bilimin de klişe sözlerinden biri haline gelen bir ifadeyle - *sezgi yaratması* gerekiyordu. Feigenbaum'un hızlandırıcısı ve kabarcık odası, bilgisayarıydı. Teorisinin yanı sıra bir de metodoloji geliştiriyordu. Normal olarak bir bilgisayar kullanıcısı bir problemi inşa eder, bilgisayarına yükler ve makinenin çözümü hesaplamasını bekler - bir problem, bir çözüm. Oysa hem Feigenbaum'un hem de onu izleyen kaos araştırıcılarının bu kadarıyla yetinmesi mümkün değildi. Aynen Lorenz'in yaptığını yapmaları, minyatür evrenler oluşturmaları ve bunların evrimini gözlemeleri gerekiyordu. Sonra da bu minyatür evrenlerin bu ya da şu özelliğini değiştirip sonuça ortaya çıkacak değişik yolları gözleyebileceklerdi. Her şeyden öteye, edinmiş oldukları bu yeni kanaata göre, bazı özelliklerde vuku bulan küçük değişiklikler davranış biçiminin tümünde kayda değer değişmeler meydana getirebiliyordu.

Feigenbaum geliştirmek istediği program teknikleri için Los Alamos'taki bilgisayar parkının hiç de uygun olmadığını kısa zamanda anladı. Los Alamos'un muazzam imkânlara sahip bulunmasına, kaynakları birçok üniversiteden fazla olmasına rağmen, grafik ve resim işlemlerinde kullanılabilecek terminallerin sayısı çok azdı; üstelik bunlar da Silah Bölümündeydi. Feigenbaum sayıları almak ve onları bir harita üzerindeki noktalar olarak yerleştirmek istiyordu. Akla gelebilecek en ilkel yönteme başvurmak zorunda kaldı: yazıcılara takılan uzun kâğıt ruloları üzerine basılan boşlukların arkasından bir yıldız ya da bir artı işaretiyle yapılan çizgiler çiziliyordu. Los Alamos'un resmi politikası uyarınca, bir tek büyük bilgisayar çok sayıda küçük bilgisayardan çok daha

iyi idi. - bu da *bir problem, bir çözüm* geleneğine tamamen uygun bir yaklaşımdı. Küçük bilgisayarlar istenmiyordu. Üstelik, bir bölüme bilgisayar alabilmek için gayet sıkı kurallara uyulması ve resmi formalitelerin tamamlanması gerekiyordu. Ancak bir müddet sonra, Teorik Çalışmalar Bölümünün bütçeyi kitabına uydurarak yardım etmesi sayesinde Feigenbaum 20.000 dolarlık bir "masaüstü hesap makinesi"ne kavuştu. Bunun üzerine, programını çalıştırırken denklemleriyle resimlerini değiştirebilmiş ve bir müzik enstrümanı çalar gibi bilgisayarıyla oynayarak bunları deforme etmek, istediği şekilde ayarlamak gibi işlemleri gerçekleştirebilmiştir. O zamana kadar, ciddi grafikleri yapabilecek terminaller sadece sıkı güvenlik kontrolu altındaki bölümlerde - kuruluşta kullanılan deyimiyle - tel örgülerin arkasında bulunuyordu. Feigenbaum merkezi bilgisayara telefon kablolarıyla bağlı olan bir terminalı kullanmak zorunda kalmıştı. Bu şartlar içinde çalışmak mecburiyeti, hattın öbür ucundaki bilgisayarın ham gücünü değerlendirebilmeyi zorlaştırıyordu. En basit işlemler bile dakikalarca sürüyordu. Programın bir tek satırını ekranda görebilmek için *Return* tuşuna bastıktan sonra, terminalin bitmez tükenmez tıkırtılarla çalışması ve merkezi bilgisayarın laboratuvardaki diğer kullanıcılarla oynadığı sorulu cevaplı elektronik oyunu bitirmesini beklemek gerekiyordu.

Feigenbaum, bilgisayarda hesaplarını sürdürürken bir yandan da düşünüyordu. Gözlediği çok sayıdaki boyutsuzluk paternlerini hangi yeni matematikle üretebilirdi? Bu fonksiyonlarla ilişkili olarak bir şeylerin *rekürsif* olması gerektiğini, *kendi kendine endeksli* olmasının - yani bir fonksiyonun davranışlarının o fonksiyonun içinde saklanmış başka bir fonksiyonun davranışları tarafından yönlendirilmesi - zorunluluğunu anladı. İlham kanallarının açık olduğu bir anda gözünde canlanan dalgalı resmin hayali, bir fonksiyonun başka bir fonksiyona uyabilmesi için nasıl boyutsuzlaşması gerektiği hakkında bir fikir veriyordu. Sonsuz değerleri işlenmeye uygun miktarlar haline indirgemek için, renormalizasyon grup teorisinin matematiksel unsurlarını, teorinin boyutsuz-

luk yönünü de kullanarak uyguladı. 1976 yılının ilkbahar aylarında o zamana kadar yaşadığı en yoğun çalışma temposuna girdi. Sanki transa girmiş gibi yoğunlaşıyor, bilgisayarında gözü dönmüşçesine program yapıyor, arkasından kurşun kalemiyle müsvetteler çiziktiriyor, sonra tekrar program yapıyordu. C bölümünden yardım isteyemiyordu, çünkü bunun için bilgisayarı devreden çıkarıp telefonu kullanması gerekecekti; ondan sonra bilgisayara tekrar hat alabilmek artık şansa kalıyordu. Düşünmek için bile beş dakikadan fazla vakti yoktu; bundan daha uzun bir ara verirse bilgisayarın hattı otomatik olarak kesiliyordu. Zaman zaman bilgisayar bozulup duruyor, Feigenbaum'un adrenalini tepesine çıkıyordu. İki ay hiç ara vermeden çalıştı. Günlük çalışma süresi yirmi iki saatti. Oturduğu yerde içi geçip gidiyor, iki saat sonra uyanıp düşüncelerini bıraktığı yerden devam ediyordu. Tek gıdası kahve idi. (En sağlıklı ve en huzurlu olduğu zamanlarda bile, Feigenbaum'un tek gıdası et, kahve ve kırmızı şaraptan ibaret olmuştur. Arkadaşlarına bakılırsa Feigenbaum vitamin ihtiyacını da sigaradan karşılıyordu.)[17]

Sonunda bir doktor bu duruma son verdi. Feigenbaum'a hafif bir Valiumlu rejim ve zorunlu tatil verdi. Ancak, o arada Feigenbaum evrensel bir teori yaratmış bulunuyordu.

Evrensellik, güzel ile faydalı arasındaki farkı ortaya çıkarır. Belirli bir noktadan sonra, matematikçiler için, yeni bir hesaplama yöntemi sağlayıp sağlamadıklarının pek önemi yoktur. Belirli bir noktadan sonra, fizikçiler sayılara ihtiyaç duyar. Evrensellik fizikçilere öyle bir umut vermiştir ki, kolay bir problemi çözdükleri takdirde çok daha zor problemleri çözebileceklerine inanmışlardır. Cevaplar birbirinin aynı olacaktır. Üstelik, Feigenbaum teorisini renormalizasyon grup çerçevesine yerleştirmekle buna, fizikçilerin hesaplamada kullanacakları, hemen hemen standart sayılabilecek bir enstrüman kisvesi de giydirmiş oluyordu.

Evrenselliği faydalı kılan nitelik, aynı zamanda fizikçilerin evrenselliğe inanmakta zorluk çekmelerine de sebep olan aynı nitelikti. Evrensellik farklı sistemlerin aynı biçimde davranması demekti. Tabii, Feigenbaum sadece basit sayı-

sal fonksiyonları inceliyordu. Bununla birlikte, teorisinin düzen ve türbülans arasındaki geçiş noktasında bulunan sistemlere ilişkin bir tabiat yasasını açıkladığı inancındaydı. Herkes türbülansın farklı frekanslardan oluşan devamlı bir spektrum anlamına geldiğini biliyordu; farklı frekansların nereden çıktığını da hep merak etmişlerdi. Birdenbire frenkansların ardışık diziler halinde geldiğini görüyordunuz.[18] Bunun fizik bakımından ifade ettiği sonuç, dünyada var olan gerçek sistemlerin aynı ve tanınabilen davranış biçimine sahip oldukları, kaldı ki, bu davranış biçiminin de ölçülebilir düzeyde aynı olduğu idi. Feigenbaum'un evrenselliği sadece bir niteliği değil, niceliği de ifade ediyordu; sırf yapısal değildi, aynı zamanda metrikti. Yalnız şekilleri kapsamakla kalmıyor, kesin sayılara kadar uzanıyordu. Fizikçi gözüyle bakılırsa, saflığın sınırlarını zorladığı görülüyordu.

Feigenbaum, aldığı red mektuplarını, hemen elinin altında olması için attığı çekmecesinde yıllar sonra bile hâlâ saklıyordu. Artık gerekmediği kadar üne kavuşmuş bulunuyordu. Los Alamos'ta yaptığı çalışma sayesinde aldığı ödüller[19] ona hem itibar hem de para kazandırmıştı. Ne var ki, yaptığı çalışmaları makale haline getirip yayınlanmak üzere gönderdiği en muteber bilim dergileri editörlerinin, çalışmalarının sonuçlarını iki sene sonra bile yayınlanmaya uygun görmeyişlerinin yarattığı burukluğu içinde taşımaya hâlâ devam ediyordu. Bilimsel bir atılımı, hem çok orijinal olması hem de beklenmedik bir şekilde ortaya atılması yüzünden yayınlamanın mümkün olmadığı şeklindeki anlayış, günümüzde artık küflenmiş bir efsaneden başka bir şey değildir. Muazzam bir enformasyon akışına sahip ve tarafsız hakem incelemesi sistemiyle donatılmış olan modern bilim anlayışını bir zevk sorunu olarak görmek mümkün değildir. Feigenbaum'un bir müsvettesini geri gönderen editörlerden biri, o alanda dönüm noktası teşkil eden bir makaleyi reddettiğini aradan yıllar geçtikten sonra kabul etmiş fakat, kendi dergisi uygulamalı matematikçilere hitap ettiği için, reddettiği makalenin o dergide yayınlanmaya zaten uygun olmadığı iddiasını sürdürmekten gene de geri kalmamıştı. Fakat bu arada, yayın bile

yapılmadığı halde, Feigenbaum'un yarattığı atılım çeşitli matematik ve fizik çevrelerinde müthiş bir haber olarak patladı. Feigenbaum'un teorisinin özü aynen bilimin günümüzde yayıldığı şekilde - konferanslar ve baskı öncesi kopyalarla - yayıldı. Feigenbaum konferanslarda çalışmalarını anlatıyordu; makalelerinin fotokopileri önceleri birer ikişer istenirken, sonradan yüzlerle talep edilmeye başlamıştı.

Modern iktisat büyük ölçüde etkin piyasa teorisine dayanır. Bilginin bir yerden başka yere serbestçe aktığı farzedilir. Önemli kararları alan kişilerin az ya da çok aynı enformasyon imkânlarından yararlanmak durumunda olduğu varsayılır. Tabii ki, belli alanlarda bilgi yetersizliği ya da içerden bilgi sızdırma gibi kopukluklara da şurada burada rastlandığı olmaktadır, fakat ekonomistler, bilgi, bütünü itibariyle herkese açık olduğu zaman, her yerde bilindiğini varsayarlar. Çoğu zaman, bilim tarihçileri kendi geliştirdikleri bir etkin piyasa teorisini tartışmaksızın geçerli kabul ederler. Yapılan yeni bir buluşun, ortaya atılan yeni bir fikrin, bilim dünyasının ortak malı olacağı farzedilir. Her buluş, her yeni yaklaşım bir öncekinin üstüne bina edilir. Bilim yükselen bir inşaat gibi, tuğla üstüne tuğla konarak yükselir. Bilimin düşünce tarihinin de, sırf pratik nedenlerle, lineer olduğu düşünülebilir.

Bu bilim anlayışının en başarılı sonuçları, iyi tanımlanmış bir bilim dalının iyi tanımlanmış bir problemin çözülmesini beklediği zaman alınmaktadır. Mesela, DNA'nın molekül yapısının keşfedilmesini yanlış anlayan hiç kimse yoktur. Ne var ki fikirlerin tarihi her zaman bu kadar açık ve seçik olmamıştır. Nonlineer bilim, çeşitli bilim dallarında kenarda köşede yetiştiği için, fikirlerin akışı klasik bilim tarihçisi mantığını izlemekte başarısız kalmıştır. Kaosun kendine özgü bir varlık olarak doğuşu sırf yeni teorilerin ve yeni buluşların hikâyesi değil, eski fikirlerin gecikmeli olarak anlaşılmasının da hikâyesi olmuştur. Bilmecenin birçok parçası çok daha önceleri - Poincaré tarafından, Maxwell tarafından, hatta Einstein tarafından - görülmüş sonra da unutulmuştu. Birçok yeni parçası da başlangıçta sadece konuların içinde olan birkaç ki-

şi tarafından anlaşıldı. Matematikte yapılan bir buluşu matematikçiler, fizikte yapılan bir buluşu fizikçiler, meteorolojide yapılan bir buluşu meteorologlar anladı. Fikirlerin yayılma tarzı meydana çıkış biçimleri kadar önem kazandı.

Her bilim adamının fikir düzeyinde mirasına konduğu kendi özel entelektüel ataları vardır. Her bilim adamının kendine ait bir fikir manzarası resmi, her resmin de kendine özgü sınırlılıkları vardır. Bilgi kusurludur. Bilim adamları, mensubu oldukları bilim dallarının örf ve adetlerine ya da kendi gördükleri eğitimdeki aksaklıklara bağlı olarak taraftgir davranırlar. Bilim dünyası bazen hayret edilecek derecede yetersiz olabilir. Daha hiçbir bilim komitesinin tarihte yeni bir çığır açtığı görülmemiştir - bunu sadece bir avuç araştırıcı kendi başına, kendi algıları ve kendi hedefleri doğrultusunda başarmıştır.

Daha sonraları, hangi buluşların ve hangi katkıların etkilerinin en güçlü olduğu konusunda bir uzlaşma belirmeye başladı. Bu uzlaşma belirli bir revizyonizm unsurunu da içermekteydi. En heyecanlı buluşların yapıldığı günlerde, özellikle 1970'li yılların sonlarında, iki fizikçinin veya iki matematikçinin kaosu tamamen aynı şekilde anladıkları görülmemiştir. Sürtünmesiz ya da tükenmesiz klasik sistemlere alışmış bir bilim adamı kendini A. N. Kolmogorov ve V. I. Arnold gibi Rus bilginlerin soyundan yetişmiş sayar. Klasik dinamik sistemlere alışık bir matematikçi kendisini Poincaré'den Birkhoff'tan Levinson'dan Smale'e uzanan bir soy kütüğüne yakıştırır. Daha sonraları, matematikçinin ataları Smale, Guckenheimer ve Ruelle'le özdeşleşir. Veya Los Alamos'la birlikte anılan bilgisayarcılık geleneğine yatkın isimleri ecdad olarak kendine uygun görür: Ulam, Metropolis, Stein. Teorik fizikçinin aklında Ruelle, Lorenz, Rössler ve Yorke vardır. Biyologun aklında Smale, Guckenheimer, May ve Yorke vardır. Bu isimlerle yapacağınız kombinasyonlar saymakla bitmez. Somut malzemeler üzerinde çalışan bilim adamı - jeolog veya sismolog - Mandelbrot'un doğrudan etkisini hürmetle yâd edecektir; teorik fizikçi ise belki Mandelbrot'un adını bile duymamıştır.

Feigenbaum'un yeri özel bir tartışma konusu oldu. Çok daha sonraki tarihlerde, az buçuk ün kazanmış biri olarak tanındığı sıralarda, bazı fizikçiler aynı problem üzerinde, üç aşağı beş yukarı Feigenbaum'la aynı zamanlarda çalışmış olan başka kimselerin adını ortaya atmaktan geri kalmadılar. Bazıları Feigenbaum'u kaotik davranış biçiminin geniş spektrumu içindeki küçük bir parçayı ele alıp, çalışmalarını çok dar bir çerçeveye inhisar ettirmekle suçladı. Bir fizikçinin söylediği gibi, "Feigenbaumoloji"[20] büyütülüyordu; şüphesiz güzel bir çalışma idi, fakat mesela Yorke'un çalışması kadar geniş bir etki alanı olmamıştı. 1984'te Feigenbaum İsveç'te Nobel Sempozyumunda bir konuşma yapmak üzere davet edilmişti; işte kavga orada çıktı. Benoit Mandelbrot'un iğneleyici imalarla dolu konuşması, dinleyenler tarafından sonradan, Mandelbrot'un "Feigenbaum aleyhtarı konferansı" olarak yorumlanmıştır. Mandelbrot nasıl yaptıysa yaptı; Myrberg adlı Finlandiyalı bir matematikçinin periyotların ikiye katlanması konusuyla ilgili olarak yazdığı yirmi senelik bir makaleyi gömülü olduğu yerden çıkardı ve Feigenbaum'un ardışık dizilerinden hep "Myrberg ardışık dizileri" olarak bahsetti.

Feigenbaum evrenselliği keşfetmiş ve bunu izah edecek bir teori yaratmıştı. Yeni bilimin dayandığı temel direk bu teori idi. Bu kadar şaşırtıcı ve sezgi karşıtı bir neticeyi yayınlatması mümkün olmayınca, çalışmalarını şifahi olarak duyurmak amacıyla 1976 Ağustos ayında New Hampshire kongresinde, Eylül ayında Los Alamos'ta yapılan uluslararası matematikçiler toplantısında bir dizi konferans vermiş; Kasım ayında Brown Üniversitesinde de birkaç konuşma yapmıştı. Feigenbaum'un buluşu ve teorisi şaşkınlık, güvensizlik ve heyecanla karşılanmıştı. Bilim adamları nonlineerlik üzerinde düşündükçe Feigenbaum'un evrenselliğinin kuvvetini daha şiddetle hissetmiştir. Bu durumu birisi şöyle izah ediyordu: "Nonlineer sistemlerde, doğru bakabildiğiniz takdirde hep aynı olduğunu gördüğünüz yapıların bulunması çok mutlu ve hayret verici bir keşiftir."[21] Bazı fizikçiler sadece fikirleri almakla kalmayıp yöntemleri de aldılar. Bu

fonksiyonlarla oynamak - sadece oynamak - fikri bile bunların tüylerini ürpertiyordu. Los Alamos'ta Feigenbaum'un en büyük desteği olan sürpriz ve tatmin duygularını onlar da kendi hesap makinelerini kullanarak tattılar. Teoriyi daha rafine hale getirdiler. Princeton'daki Institute for Advanced Study'de (Yüksek Araştırmalar Enstitüsü) Feigenbaum'un konuşmasını dinleyen Predrag Cvitanovic adlı bir parçacık fizikçisi Feigenbaum'un teorisini sadeleştirmesine ve evrenselliğinin kapsamını yaymasına yardımcı oldu. Cvitanovic, bu arada bu çalışmayı sırf eğlence kabilinden yaptığını söylüyordu;[22] yaptıklarını meslektaşlarının önünde açıkça kabul etmek cesaretini gösteremedi.

Matematikçilerin tutumunda da aynı ihtiyatlı yaklaşım görülüyordu, bunun sebebi, büyük ölçüde, Feigenbaum'un teorisini sağlam bir kanıtla desteklemiş olmaması idi. Gerçekten de, matematikçileri tatmin edecek bir kanıt ancak, 1979'da, Oscar E. Lanford III'ün çalışmasıyla[23] ortaya çıktı. Feigenbaum teorisini Los Alamos'ta Eylül ayında toplanan seçkin bir dinleyici topluluğuna izah ettiğini sık sık hatırlardı. Daha çalışmasını açıklamaya başlar başlamaz, meşhur matematikçi Mark Kac kalkıp şu soruyu sormuştu: "Hocam, maksadınız bize sayılar mı göstermek, yoksa kanıtlar mı?"[24]

Feigenbaum'un cevabı, biraz eksiği biraz fazlasıyla ikisinin de olduğu şeklindeydi.

"*Sağduyu* sahibi bir insanın kanıt diyeceği türden bir şey mi?"

Feigenbaum vereceği cevabın takdirini doğrudan doğrudan dinleyicilere bıraktığını söyledi. Konuşması bittikten sonra kanaatini sorduğu Kac, müstehzi bir şekilde yuvarladığı *r*'leriyle şu cevabı verdi: "Evet, doğrusu anlattıklarınız sağduyu sahibi bir insanın vereceği türden kanıt sayılır. İşin ayrıntı kısmı *r-r-rahatlıkla* sırfi matematikçilere bırakılabilir."

Bir hareket başlamış, evrenselliğin keşfi de bunu daha ileri boyutlara götürmüştü. 1977 yılının yaz aylarında[25] Joseph Ford ve Giulio Casati adlı iki fizikçi, kaos adı verilen bir bilim dalında ilk kez bir konferans düzenlediler. Konferans, İtalya'nın Como şehriyle aynı adı taşıyan, İtalyan Alp-

lerinin eriyen karlarının toplandığı harika bir koyu mavi rengi olan gölün güney sahilindeki güzel bir villada yapıldı. Katılanların sayısı yüzü buluyordu; çoğunluğu fizikçiydi, fakat merak saikiyle gelmiş başka bilim dallarına mensup kimseler de vardı. Ford şöyle diyordu: "Mitch evrenselliği görmüş[26] ve hangi ölçek düzeylerinde bulunduğunu bulmuştur; kaos doğrultusunda açtığı yol sezgi olarak çok caziptir. İlk defa herkesin anlayabileceği kadar açık ve seçik bir modelimiz oldu.

"Bu da artık zamanı gelmiş konulardan biriydi. Astronomiden zoolojiye kadar bütün bilim dallarında herkes aynı şeyi yapıyor, kendi bilim dalına ait dergilerin dar çerçevesi içinde makalelerini yayınlıyor, etrafta kendilerinden başka insanlar da bulunduğunu tamamen bilmezden geliyorlardı. Orada kendilerinden başka hiç kimse olmadığını düşünüyor ve kendi alanlarında biraz da eksantrik olarak görüldüklerini sanıyorlardı. Aklınıza gelebilecek bütün basit sorunları tüketmişler ve biraz daha komplike olan fenomenler üzerine kafa yormaya başlamışlardı. Bu insanlara kendilerinden başka kimselerin de aynı yerlerde olduğunu gösterince, minnettarlık duygusuyla neredeyse gözleri yaşarırdı."

O aralar, Feigenbaum, içinde eşya namına, bir odada bir yatak, ikinci odada bir bilgisayar, üçüncüde de çoğunluğu Alman müziğinden oluşan plaklarını dinlemek için üç siyah "elektronik kule" bulunan bir apartman dairesinde yaşıyordu. Evini döşemek için hayattaki tek girişimi de fiyaskoyla sonuçlanmıştı; İtalya'ya gittiği sırada dünyanın parasını ödeyerek satın aldığı bir mermer kahve sehpası eline geldiğinde mermer parçalarından ibaret bir paket halindeydi. Hızlı konuşur, kırlaşmış kestane rengi uzun saçlarını alnından geriye doğru yatırırdı. "1920'li yıllarda herkesin dikkatini çeken bir olay oldu.[27] Fizikçilerin çevrelerindeki dünyaya ilişkin olarak, esas itibariyle doğru olan bir betimleme, durduk yerde, onların ayaklarına geldi - çünkü kuantum mekaniği teorisi bir anlamda, esas itibariyle doğrudur. Size, tozu toprağı alıp bunlardan nasıl bilgisayar yapacağınızı öğretir. Evrenimize nasıl el atabileceğimizi biz bu teori sayesinde

öğrendik. Kimyasal maddeler, plastikler ve daha neler neler bunun sayesinde yapılmaktadır. İnsan bununla nasıl hesap yapılacağını bilir. Olağandışı iyi bir teoridir - ancak belirli bir düzeyde biraz mantığın dışına kaçmaktadır.

"Teorinin nispeten eksik kalan kısmı hayal yanıdır. Bu teori çerçevesinde denklemlerin gerçekte ne ifade ettiğini ve dünyanın nasıl betimlendiğini sorarsanız, sizin dünyaya ilişkin sezgilerinize hitap etmeyen bir betimleme ile karşılaşırsınız. Bir parçacığın sanki bir güzergâhı varmışçasına hareket ettiğini düşünemezsiniz. O parçacığı gözünüzde bu şekilde canlandırmanıza imkân verilmez. Daha da inceliği olan konularda sorular sormaya başlarsanız - bu teoriye göre sizce dünya neye benziyor? - sonunda dünyaya normal bakış açınızdan o kadar uzaklaşmış olursunuz ki, aklınız bin bir çelişki içine düşer. Belki de şimdi dünya hakikaten böyledir. Fakat siz, olayları sezgiyle algılamanızı sağlayan yoldan bu kadar radikal bir sapma yapmanızı gerektirmeyen bütün bu enformasyonu toplamanın başka bir yolu olup olmadığını gerçekten bilmezsiniz.

"Fizikte şöyle bir temel varsayım vardır: Dünyayı anlamak için, onu meydana getiren bütün parçaları birbirinden tek tek ayırırsınız ve gerçekten önemli olduğunu düşündüğünüz temel konuları anlayıncaya kadar aynı şeyi yapmaya devam edersiniz. Bundan sonra, anlamadığınız diğer konuların ayrıntı olduğunu farzedersiniz. Buradaki varsayım şudur: Nesnelere en saf, en katışıksız haliyle bakarak - işte bu gerçek analitik yaklaşımdır - birbirinden ayırt edebileceğiniz birkaç tane prensip vardır; daha zorlu problemleri çözmek istediğiniz zaman bu prensipleri daha komplike bir şekilde bir araya getirmenin yolunu bulursunuz. Tabii becerebilirseniz.

"Anlamak için, sonunda vites değiştirmeniz gerekir. Olup biten önemli şeyleri nasıl kavradığınıza oturup yeniden bakmanız gerekir. Bir akışkan sistemi model olarak bilgisayarda simüle etmiş olabilirsiniz. Artık bu da mümkün olmaktadır. Fakat boşa çaba harcamış olursunuz, çünkü *gerçekten* olup biten şeylerin ne bir akışkanla ne de özel bir denklemle ilişkisi vardır. Böylece, olguların kendi kendilerini sonsuza ka-

dar tekrar üretebildiği zaman, birçok değişik sistemde neler olup bittiğinin genel bir betimlemesi yapılmış olmaktadır. Sorun hakkında düşünürken değişik bir yaklaşım gereklidir.

"Bu odaya baktığınızda (şurada duran birtakım öteberi, burada oturan bir insan, oralarda kapılar görüyorsunuz) maddenin temel ilkelerini alacağınız ve bunları betimlemek için dalga fonksiyonlarını yazacağınız varsayılır. İşte bu düşünceyi gerçekleştirmek mümkün değildir. Belki Tanrı bunu yapabilir, fakat böyle bir problemi anlayabilmemizi sağlayacak hiçbir analitik düşünce tarzı mevcut değildir.

"Bir buluta ne olacağını sormak da artık bilimsel düzeyde bir sorgulama değildir. İnsanlar çok şeyi bilmek ister - bu da bu amaçla ayrılmış para bulunduğunu gösterir. Bu problem fizik biliminin araştırma alanı içine dahildir; kaldı ki en az fiziğin kendisi kadar geniş kapsamlı bir sorundur. Komplike bir soruna bakarsınız; şimdiki zamanda bunu çözmenin yolu, sorunda yapabildiğiniz kadar çok noktaya bakmak, yani bulutun nerede olduğunu, sıcak havanın nerede olduğunu, hızının ne olduğunu vesaire söylemenize yetecek kadar çok veri toplamaktır. Sonra bu verileri bulabildiğiniz en büyük makineye doldurur ve bundan sonra ne yapacağı hakkında bir tahmin çıkarmaya çalışırsınız. Ancak bu da çok gerçekçi bir çare sayılmaz."

Sigarasını söndürüp başka bir sigara yaktı. "İnsan başka başka yollar aramalıdır. İnsan boyutsuz yapıları - büyük ayrıntıların küçük ayrıntılarla ilişkilerini - araştırmalıdır. Akışkanlardaki pertürbasyonlara da bakarsınız; bunların komplike yapısında karmaşıklığı meydana getiren sürecin devamlılığını görürsünüz. Bu pertürbasyonlar belli bir düzeye ulaştıktan sonra artık bu sürecin boyutları onları pek ilgilendirmez - süreç bezelye büyüklüğünde de olabilir, basketbol topu büyüklüğünde de. Sürecin kendi de nerede bulunduğuyla pek ilgilenmez; hatta süresinin ne kadar olduğuyla da ilgilenmez. Bir bakıma, evrensel olması mümkün olabilen tek şey, boyutsuz olgulardır.

"Bakarsanız sanat, dünyanın insanlara nasıl baktığına ilişkin bir teoridir. Etrafımızdaki dünyayı bütün ayrıntıla-

rıyla bilmediğimiz de yeteri kadar açık bir gerçektir. Sanatçıların yaptığı şudur: Bunlar etrafımızdaki olgulardan sadece küçük bir kısmının önemli olduğunu fark etmişler; sonra da bunların nasıl olduğuna bakmışlardır. Yani benim araştırmalarımın bir kısmını rahatlıkla yapabilirler. Van Gogh'un ilk yaptığı resimlere bakın, içine milyarlarca detay koymuş olduğunu görürsünüz; resimlerinde hep müthiş miktarda enformasyon vardır. Yahut 1600'lü yıllarda, Hollanda'da çini mürekkebiyle yapılmış desenlerdeki manzaraları inceleyin; bunlarda çok gerçekçi küçük ağaçlar ve inekler görürsünüz. Yakından bakın, ağaçların bir nevi yapraklı sınırları olduğunu görürsünüz, ama hepsi bu kadar olsa yanlış olur - resimlerde yapraklara yapışık, dala benzeyen birtakım desenler de vardır. Yumuşak dokulu nesnelerle daha kesin hatları olan nesneler arasında kesin bir etkileşim vardır. Bu iki tür nesnenin bir araya gelmesinden doğru algı çıkmaktadır. Ruysdael ve Turner'in* manzara tablolarında suyun komplike halini nasıl inşa ettiklerine bakın; iterasyon unsurunu kullandıklarını açıkça görürsünüz. Önce bir kat boya sürmüşler, sonra onun üstüne bir kat daha geçmişler, sonra da üzerinde düzeltmeler yapmışlardır. Bu ressamlara göre, türbülanslı akışkanların içinde her zaman bir boyutsuzluk fikri vardır.

"Ben gerçekten bulutların nasıl betimlenebileceğini bilmek isterim. Ancak, burada yoğunluğu bu kadar olan bir bölüm var, yanı başında da yoğunluğu şu kadar olan bir başka bölüm var, demeniz - bu kadar ayrıntılı enformasyonu toplamanız - bence yanlış olur. Emin olun, insanlar olguları bu şekilde algılamaz; sanatçılar da bu şekilde algılamaz. Bir bakıma, kısmi diferansiyel denklemleri yazmak problemi çözmek anlamına gelmez.

"Özetle, dünyanın size verebileceği en harika şey, içindeki güzellikler, harika ve büyüleyici şeylerdir; mesleğiniz dolayısıyla siz de bunları anlamak istiyorsunuz." Sigarasını elin-

*Jacob van Ruysdael 1628-1682 yılları arasında yaşamış Hollandalı bir manzara ressamıdır; Joseph Mallord Willam Turner 1775-1851 yılları arasında yaşamış bir İngiliz manzara ressamıdır. (ç.n.)

den bıraktı. Sigaranın dumanı, önce küllükten yukarı doğru ince bir sütun halinde, sonra (evrenselliğe küçük bir selâm çakarak) kırık sarmaşık dalları gibi kıvrılarak tavana doğru yükseldi.

Deneysel Fizikçi

İnsanın aklından geçen bir şeyin doğada vuku bulan bir olaya tamamen uygun olduğunun bilincine varan bir bilim adamının yaşadığı bu tecrübe öyle eşi emsali olmayan bir tecrübedir ki, hayatta başından bundan daha güzel bir şey geçeceğini sanmıyorum. Böyle bir tecrübeyi her yaşadığında sanki ilk defa başına geliyormuş gibi şaşakalır. İnsan kendi zihninde inşa ettiği bir tasarımın şu dünyada hakikaten gerçekleşebildiğini görünce hayrete düşmekten kendini alamaz. Bu duygu hem büyük bir şok gibi gelir hem de müthiş büyük bir keyif verir.

LEO KADANOFF

"Albert yaşlanıyor galiba."[1] Fransa'da eğitim kurumlarını bir sıraya dizdiğiniz takdirde École Polytechnique'le birlikte en tepeye oturacak olan École Normale Supérieure'de bu söz ağızlardan düşmüyordu. Düşük sıcaklık fiziğinde ün salmış, süper akışkan helyumun kuantum davranışını mutlak sıfırdan bir nebze daha yüksek sıcaklıklarda inceleyen Albert Libchaber'in yaptığına acaba yaşlılık alameti olarak mı bakmak gerektiği konusunda kararsız kalmışlardı. Fakültede forsu yerindeydi; yeri de sağlamdı. Şimdi, 1977'de, hem vaktini hem de üniversitenin parasını çok fuzuli olduğu düşünülen bir deney yaparak çarçur ediyordu. Kaldı ki Libchaber'in kendisi de, doktora öğrencilerinden birini böyle bir projede çalıştırdığı takdirde bir gencin istikbalini harcamış olacağından endişe ettiği için, bir öğrenci yerine bir mühendisi kendisine yardımcı olarak aldı.

Libchaber, Alman işgalinden beş yıl önce Paris'te, Polonyalı bir yahudinin oğlu olarak Paris'te doğmuştu; dedesi de hahamdı. Çok bozuk bir şiveyle konuşan anne ve babasından savaş sırasında ayrılıp taşrada saklanarak, aynı Mandelbrot'un yaptığı gibi canını kurtardı.[2] Anne ve babası da hayatta kalmayı başarmış; ailenin geri kalan kısmı Nazilerin kurbanı olmuştu. Kaderin bir cilvesi olarak, Libchaber hayatını gene siyasete borçludur; Pétain'in gizli polis teşkilatının yerel düzeydeki şeflerinden biri hem hızlı bir aşırı sağcı hem de hızlı bir ırkçılık aleyhtarı olması dolayısıyla Libchaber'i himayesi altına aldı. Savaş bittikten sonra da, on yaşındaki çocuk kendisine yapılan bu iyiliği karşılıksız bırakmadı. Savaş suçlarını araştırmak için kurulmuş bir komisyonun önünde, yarım yamalak anladığı kadarıyla verdiği ifade sayesinde adamın hayatı kurtuldu.

Fransız üniversite düzeni içinde bilim yaşamına adım attıktan sonra meslekte basamakları hızla tırmanırken iyi bir akademisyen olduğu konusunda kimsenin en ufak bir tereddütü yoktu. Meslektaşları bazen Libchaber'in biraz deli olduğunu düşünürlerdi; rasyonalistlerin olduğu yerde Yahudi mutasavvıfı, bilim adamlarının çoğunluğunun Komünist olduğu yerde de Gaulle'cü olurdu. Tarih konusunda Büyük Adam teorisine inanmasıyla, Goethe'ye sabit fikir derecesinde hayranlık duymasıyla, eski kitaplara düşkün olmasıyla alay ederlerdi. Bilim adamlarınca yazılmış, bazıları yayımlanma tarihi 1600'lü yıllara kadar geri giden yüzlerce eserin orijinal nüshalarını toplamıştı. Bunları sırf tarihe merak duyduğu için okumuyordu; bunlardan gerçeğin doğası hakkında aldığı fikirler kendisine taptaze bir ilham kaynağı oluyordu; lazerleri ve ileri teknolojiye dayalı soğutma helezonları ile ölçüp biçtiği gerçek de zaten aynı bu gerçekti. Yardımcısı olan Jean Maurer adındaki mühendis, sadece içinden geldiği zaman çalışan, Libchaber'in tam kafa dengi bir Fransızdı. Libchaber yeni projesini Maurer'in de *eğlenceli* bulacağını sanıyordu - Fransızların *bilmece gibi*, veya *heyecan verici* ya da *derinliği var* gibi sözleri yerine bu sıfatı tercih etmişti. İki kafadar 1977'de türbülans eşiğini ortaya çıkaracak olan bir deneyi gerçekleştirmeye koyuldu.

Libchaber, uyanık zekâsı, maharetli elleri ve aklı daima kaba kuvvete üstün tutması gibi özellikleri ile deneysel fizikçilikte on dokuzuncu yüzyıl stilini yaşatan kimse olarak tanınıyordu. Teknolojide muazzam boyutlardan ve devasa hesap işlemlerinden hiç hoşlanmazdı. Libchaber için iyi bir deney demek tıpkı, matematikçinin iyi bir kanıttan anladığı neyse o demekti. Alınacak sonuç kadar zerafetin de yeri ve önemi vardı. Bütün bunlara rağmen, meslektaşlardan bazıları Libchaber'in türbülans eşiği deneyinde biraz mübalâğa ettiği görüşündeydiler. Bütün deney bir kibrit kutusuna koyup götürülecek kadar bir şeydi; zaten Libchaber'in de deney aletini arada sırada modern bir sanat eseri gibi eline alıp dolaştığı olurdu. Deneyine "Küçük Kutunun İçindeki Helyum"[3] adını takmıştı. Deneyin özü aslında içinde bulunduğu kutudan daha da küçüktü: Limon çekirdeği büyüklüğünde, paslanmaz çeliğin içi oyularak yapılmış, cidarları ve çeperleri olabildiğince keskin bir hücre. Bu hücrenin içine mutlak sıfırdan dört derece daha yüksek sıcaklığı olan sıvı helyum konuyordu; bu helyum, Libchaber'in eskiden yaptığı süper akışkan deneylerine göre daha sıcak sayılabilirdi.

Laboratuvar, Paris'te Louis Pasteur'ün eski laboratuvarının bulunduğu yerden yüz elli, iki yüz metre* kadar uzakta, Ecole Normale'in fizik bölümü binasının ikinci katında bulunuyordu.[4] Bütün genel amaçlı iyi fizik laboratuvarlarında olduğu gibi, Libchaber'in laboratuvarı da her zaman darmadağınıktı; boya kutuları, aletler yerlerde ya da masaların üstünde, küçüklü büyüklü metal ve plastik parçaları, çarşamba pazarı gibi sağda solda atılı vaziyette bulunurdu. Bu kargaşanın tam orta yerinde, Libchaber'in minimini akışkan hücresinin içinde durduğu cihaz, keşmekeşin ortasında bir ümit anıtı gibi yükseliyordu. Paslanmaz çelikten yapılmış hücrenin alt tarafında olabildiğince saf bakırdan bir levha vardı. Üst tarafına ise safirden yapılmış bir billur levha konmuştu. Malzemeler ısıyı iletme derecelerine göre seçilmişti. Elektrikle ısıtmak için küçücük rezistans telleri ve teflon contalar vardı. Sıvı hel-

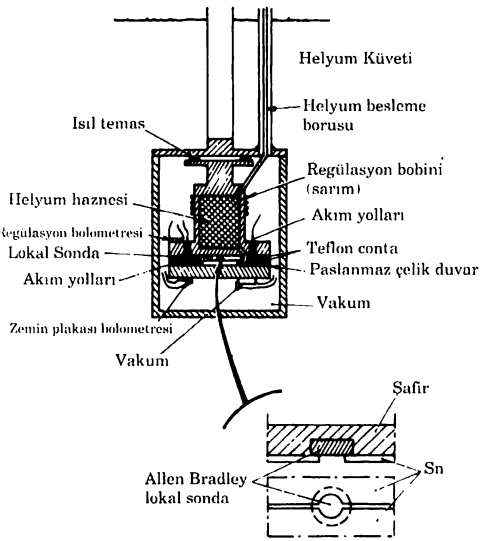
*İngilizce metinde 'birkaç yüz fit'. (ç.n.)

yum yaklaşık iki santimetre küp* kadar bir hazneden aşağıya akıyordu. Bütün bu sistem, havası tamamen boşaltılmış bir kabın içine yerleştirilmişti. Bu kap da, sıcaklığı istikrarlı bir durumda tutabilmek için sıvı azot içine daldırılmıştı.

Libchaber'i en çok endişelendiren şey titreşimdi. Gerçek nonlineer sistemler gibi, deneyler de sabit bir gürültü ortamında gerçekleştirilmekteydi. Gürültü ölçümleri yanıltıyor ve verilerin bozuk çıkmasına neden oluyordu. Hassas akışlarda - üstelik Libchaber bu deneyde azami yapabileceği kadar hassas bir akış gerçekleştirmek zorundaydı - gürültünün nonlineer bir akışta ani pertürbasyonlara neden olarak, akışı bir davranıştan başka bir davranışa geçecek şekilde tepmesi ihtimali vardı. Ne var ki, nonlineerlik bir sistemin istikrarını nasıl bozabiliyorsa, aynı sisteme istikrar da kazandırabilir. Nonlineer feedback hareketi düzenleyerek onu daha dayanıklı hale getirir. Lineer bir sistemde pertürbasyonların sabit bir etkisi vardır. Nonlineerliğin mevcut olduğu bir ortamda, pertürbasyon ancak kendi kendini besleyebildiğinden sonunda yok olup gitmekte ve sistem otomatik olarak istikrarlı bir duruma geri dönmektedir. Libchaber biyolojik sistemlerin kendi nonlineerlik vasıflarını gürültüye karşı bir savunma mekanizması olarak kullandıklarına inanıyordu. Proteinler vasıtasıyla enerji transferi, kalbin elektriğinin yarattığı dalga hareketi, sinir sistemi - bunların hepsi, gürültü dolu bir dünyada biyolojik sistemlerin çok yönlü yaşamlarını sürdürmelerini sağlıyordu. Libchaber, temelindeki yapı ne olursa olsun, akışkanlardaki akışın çok dayanıklı olduğunu ve deneyi sayesinde bu özelliği yakalayıp ortaya çıkarabileceğini umuyordu.

Libchaber'in planı, tabandaki levhayı tavandaki levhadan daha sıcak hale getirip sıvı helyumun içinde konveksiyon yaratmaktı. Yaptığı şey tamamen Edward Lorenz'in tanımladığı konveksiyon modelindeki Rayleigh-Bénard konveksiyonu adıyla bilinen klasik sistemdi. Libchaber'in Lorenz'in yaptıklarından haberi yoktu - henüz bilmiyordu. Mitchell Feigenbaum'un teorisi hakkında da hiçbir fikri yoktu. 1977'de Feigenbaum bilimsel konferanslar devresine daha

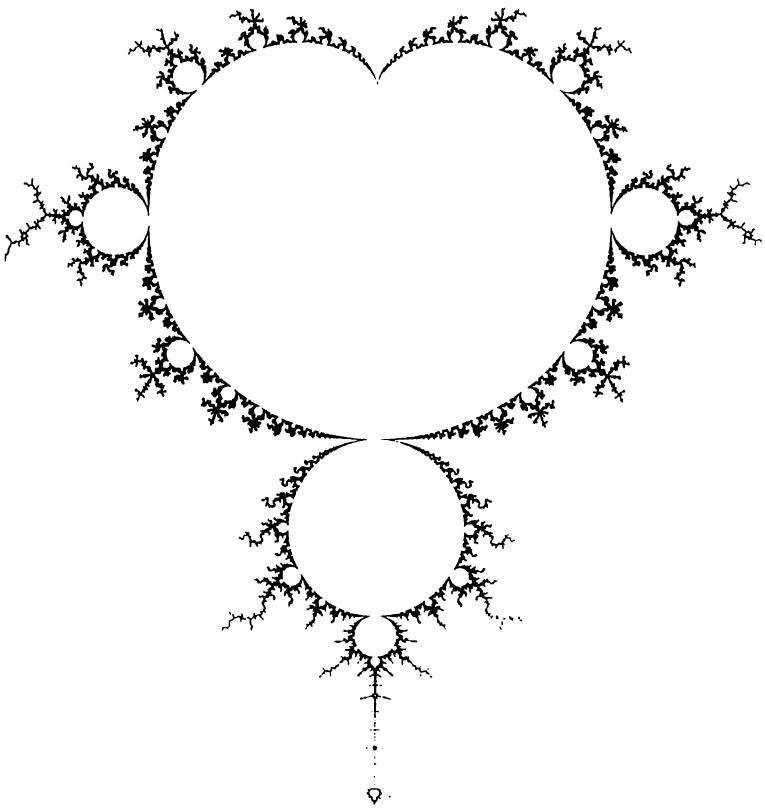
*İngilizce metinde yarım inç küp. (ç.n.)

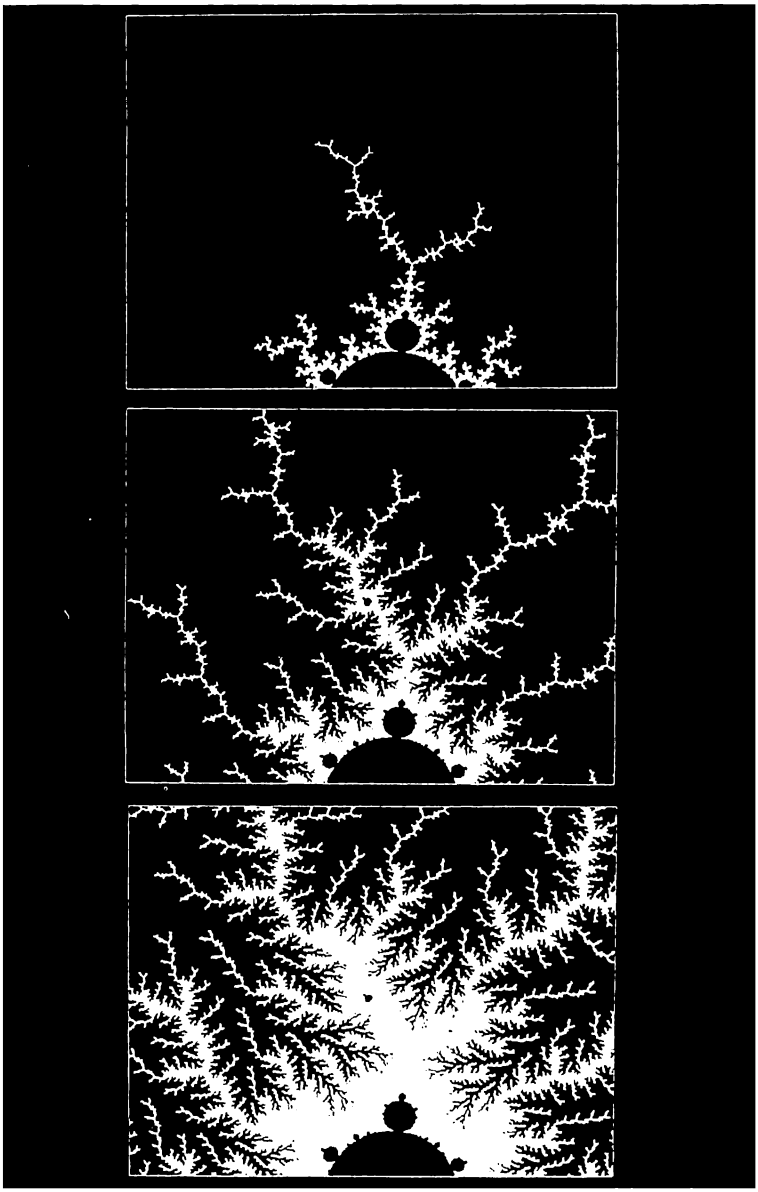


"KÜÇÜK BİR KUTUNUN İÇİNDEKİ HELYUM." Albert Libchaber'in hassas deneyi: Merkezinde, içinde sıvı helyum bulunan çok muntazam imal edilmiş dikdörtgen bir hücre vardı; akışkanın sıcaklığı minik safir "bolometre"lerle ölçülüyordu. Bu küçücük hücre, gürültü ve titreşimden korunmasını ve ısıtmanın hassas bir şekilde denetlenebilmesini sağlamak için bir muhafaza içine oturtulmuştu.

yeni yeni girmeye başlamıştı; yaptığı buluşlar da ancak bunları yorumlamasını bilen bilim adamlarının bulunduğu yerlerde iz bırakabiliyordu. Fizikçilerin çoğunluğuna bakılırsa Feigenbaumolojideki şekiller ve düzenliliklerin gerçek sistemlerle açıkça görülebilen hiçbir ilişkisi yoktu. Bu şekiller sayısal bir hesap makinesinden çıkıyordu. Oysa fiziksel sistemler bundan sonsuz derecede daha karmaşık idi. Elde daha fazla kanıt bulunmadığına göre, bu konuda en fazla söylenebilecek şey, Feigenbaum'un türbülansın başlangıcına *benzeyen* matematiksel bir analoji keşfetmiş olduğu idi.

Libchaber'in de bildiği gibi, Amerikalıların ve Fransızların yaptıkları deneyler, türbülansın farklı frekansların devamlı olarak üst üste yığılması suretiyle belirmediğini, bunun aksine, çok ani bir geçiş olarak belirdiğini göstermiş ve böylece Landau'nun türbülans eşiği fikrini zayıflatmıştı. Jerry Gollub ve Harry Swinney gibi deneysel fizikçilerin dönen silindir içindeki akış deneyi de, yeni bir teorinin gerekli olduğunu göstermiş fakat, deneyciler kaosa geçiş halini açık ve seçik ayrıntılarıyla görmeye muvaffak olamamışlardı. Libchaber türbülans





eşiğinin açık ve seçik bir resminin henüz laboratuvar düzeyinde elde edilemediğini biliyordu; o küçücük akışkan hücresi sayesinde en açık ve seçik resmi yakalamaya karar verdi.

Görüş açınızı daralttığınız takdirde bilimde ilerleme sağlayabilirsiniz. Akışkanlar dinamikçisi gözüyle bakarsanız Couette akışı alanında ileri derecede hassas bir deney gerçekleştirdiklerini iddia eden Swinney ve Gollub'un bu iddialarını şüpheyle karşılamalarına hak verirsiniz. Matematikçi gözüyle bakarsanız Ruelle'e kızmalarına - ki, zaten onlar da öyle yapmışlardır - hak verirsiniz. Ruelle kuralları ihlâl etmişti. Gayet iddialı bir fizik teorisini sımsıkı bir matematiksel giysiye büründürerek ortaya sürmüştü. Varsaydığı şey ile kanıtladığı şeyi birbirinden ayırt etmeyi imkânsız hale getirmişti. Bir fikri, *teorem, kanıt, teorem, kanıt* şeklindeki standart şema çerçevesinde ifade edilmedikçe kabul etmeyen bir matematikçi, aslında matematik alanında matematikçiye verilmiş olan bir görevi yerine getirmiş olmaktadır: Bilinçli olarak ya da olmayarak sahtekârlara ve mistiklere karşı matematiğin bekçiliğini yapmaktadır. Yeni fikirleri, herkesin aşina olduğu tarza uygun bir biçimde dökülmediği için reddeden dergi editörünün böylece mağdur ettiği kişiler, o editörü, kendi bilim dallarına çöreklenmiş meslektaşlarının çıkarlarını koruyan bir kişi olarak görebilirler. Ancak, henüz sınanmamış olan şeyler karşısında müteyakkız bulunmayı haklı gören bir topluluk içinde, o editör de kendisine verilmiş bir görevi yerine getirmektedir. Libchaber'in kendisi bile, "Bilim dünya kadar saçmalığa karşı mücadele verilerek inşa edilmiştir,"[5] demiştir. Meslektaşları Libchaber'e mistik sıfatını yakıştırdılarsa bunu kendisini sempatik buldukları için söyledikleri sanılmasın.

Libchaber, titiz, disiplinli, maddeye ilişkin analizlerinde aşırı hassas davranmasıyla tanınmış bir deneysel fizikçiydi. Buna rağmen, *akış* denen soyut, iyi tanımlanmamış, hayaletimsi bir şey onu inanılmaz derecede çekmiştir. Akış, şekil artı değişme, hareket artı formdu. Diferansiyel denklem sistemlerini kavramaya çalışan bir fizikçi, bu sistemlerin matematiksel hareketlerine *akış* adı verebilirdi. Akış, sistemlerdeki değişmenin belirli bir anda vuku bulan şeyden bağımsız bir gerçeği yansıt-

tığını varsayan, tam Platon'a yakışır cinsten bir fikirdi. Libchaber, Platon'un evrenin gizli formlarla dolu olduğu düşüncesini benimsemişti. "Ama siz de gerçekten öyle olduğunu biliyorsunuz! Yapraklar görmüşsünüzdür. Bütün yapraklara baktığınızda, yaprak şekillerinin sayı olarak ne kadar az olduğu sizi hiç şaşırtmadı mı? Yaprağın geneldeki şeklini siz de kolayca çizebilirsiniz. Bu şekli anlamaya çalışsanız epeyi ilginç bulursunuz. Ya da başka şekilleri. Bir deney yaparken, bir sıvının başka bir sıvının içine girdiğini görmüşsünüzdür."[6] Masasının üstü bu tür deneylerde alınmış resimlerle, tombul fraktal sıvı parmaklarıyla doluydu. "Şimdi mutfağınızda gazı açın, alevin de bu şekilde olduğu görürsünüz. Bu şekil çok yaygındır. Evrenseldir. İster yanan bir alev olsun ister bir sıvı içindeki başka bir sıvı ister katılaşan bir kristal, benim için hiç fark etmez, beni ilgilendiren tek şey bu şekildir.

"On sekizinci yüzyıldan bu yana görülen bir rüya var; buna göre bilim, şeklin uzay içindeki evrimini ve şeklin zaman içindeki evrimini atlamıştır. Bir akışı düşündüğünüzde, bir akışı düşünmenin birçok yolu vardır, iktisatın akışı ya da tarihin akışı. Akış önce tabakalar halindedir, sonra çatallaşıp çok daha komplike bir duruma, hatta salınımlı bir hale geçer. Daha sonra da kaosa dönüşür."

Şekillerin evrenselliği, boyutsuzluğu aşan benzerlikler, akış içindeki akışların yinelenme gücü, bütün bunlar değişme denklemlerine ilişkin standart diferansiyel hesaplama yaklaşımının kapsamı dışında kalmaktadır. Fakat bunu görebilmek kolay olmamıştır. Bilimde problemler mevcut olan bilimsel dille ifade edilir. Libchaber'in akışlara ilişkin sezgilerini ise bugün de dahil yirminci yüzyılda ifade edebilecek tek dil ancak şiir dili olabilir. Mesela, Wallace Stevens, fizikçilerin bilgisinin çok ötelerine geçen bir dünya görüşünü ortaya koymuştur. Akışın değiştiği sırada kendi şeklini nasıl tekrarladığı konusunda bir şüphe içini kemiriyordu:

"Benekli nehir[7]
Akar durur hem de asla bir daha aynı olmadan, akar
Çok yerden, sanki tek yerde dururcasına."

Stevens'in şiiri zaman zaman gözümüzde çalkantılı bir havayı ya da çırpıntılı bir suyu canlandırır. Tabiatın üstünü örttüğü görünmez şekillere ilişkin manevi bir inancını ortaya koymuştu ki, bu görüşü çerçevesinde,

"gölgesizliğinde atmosferin,
Nesnelerin bilgisi kalmıştı çevremizde, algılanmadan."

1970'li yıllarda Libchaber ve diğer bazı deneysel fizikçiler akışkan cisimlerin hareketleri konusuna eğilmeye başladıklarında, yaklaşımlarının temelini sanki bu yıkıcı şiirsel anlayış oluşturuyordu. Hareket ve evrensel form arasında bir bağlantı bulunduğundan onlar da şüphe ettiler. Veri toplamak için, sayıları kaydedip sonra da sayısal bir bilgisayara işlediler, ellerinden sadece öylesi geliyordu. Bundan sonra verileri düzenlemek suretiyle şekilleri ortaya çıkarmanın yollarını araştırdılar. Şekilleri hareketle ilişkili kavramlarla ifade edebileceklerini ümit ettiler. Alev gibi dinamik şekillerin ve yaprak gibi organik şekillerin bu formlarını, daha henüz ne olduğu anlaşılamamış bir kuvvetler örgüsünden aldıklarından emindiler. Bu deneysel fizikçiler, kaosu hiç bıkmadan usanmadan izlemiş tek araştırıcılar olarak, donmuş hareketsizlik sayılabilecek her türlü hakikatı tanımayı reddetmek suretiyle amaçlarına erdiler. Bunların yaklaşımını Libchaber bile aynı terimleri kullanarak ifade etmek cesaretini gösterememişti, ama bu yaklaşımları Stevens'in "katının katı olmayan kabarması"[8] olarak algıladığı duygulara çok yakın düşüyordu:

"İzzet ve itibarın gücü, damarlardaki bir pırıltı,
Bir şeyler belirir ve yerinden oynar ve çözülürken,

Ya uzaklarda bir yerde, değişim ya da hiçlik,
Gözle görülen şekil değiştirmeler yaz gecesinde,
Gümüşi bir soyutluk ki adeta biçimleniyor
Ve apansız inkâr ediyor kendi kendini."

Libchaber'e mistik ilhamını veren Stevens değil, Goethe'dir. Feigenbaum Goethe'nin *Renkler Teorisi* adlı eserini daha Harvard kütüphanesinde aradığı sıralarda, Libchaber *Bitkilerin Transformasyonuna Dair* adlı eserin daha da karanlıkta kalmış orijinal bir baskısını eski eserler koleksiyonuna ilave edivermişti bile. Bu eserle, Goethe fizikçilere dolaylı bir saldırı yöneltmişti; çünkü onların, zaman zaman gördüğümüz şekilleri üreten yaşam güçleri ve akışlarla ilgilenmek yerine sadece statik fenomenlere ilgi gösterdiklerine inanıyordu. Goethe'nin mirasının bir bölümü - edebiyat tarihçileri de bu bölümün ihmal edilebilecek kadar küçük olduğu görüşündedir - Almanya ve İsviçre'de yankılarını bulan bilim benzeri bir akımdır ve bunu yaşatanlar Rudolf Steiner ve Theodor Schwenk gibi filozoflardır. Libchaber bu kimseleri de bir fizikçi ne kadar takdir edebilirse o kadar takdir etmiştir.

"Hassas kaos" - *Das sensible Chaos* - Schwenk'in kuvvet ve form ilişkisini ifade etmek için kullandığı deyimdir. İlk kez 1965'de yayınladığı garip bir küçük kitabın adı olarak kullanmış; bu kitap sonraları baskısı bittikçe yeniden basılıp durmuştu. Öncelikle suyu konu alan bir kitaptı. İngilizce baskısı Binbaşı Jacques Y. Cousteau'nun* harika bir önsözü ve *Water Resources Bulletin ve Journal of the Institute of Water Engineers*'teki tavsiye yazılarıyla birlikte yayınlanmıştı. Schwenk'in eserinin bilimsel açıdan pek öyle iddiası yoktu; hele matematik alanında hiçbir iddiası yoktu. Buna rağmen görüşlerini kusursuz bir şekilde açıklamaya itina gösteriyordu. Bir sürü doğal akış şekillerini kitabında artist gözüyle sundu. Fotoğraflar topladı, hayatında edindiği ilk mikroskobuyla hücrelere bakan bir biyologun çizdiği taslaklar gibi, düzinelerle ince ince resimler yaptı. Fikirleri o kadar berrak ve düşüncesi o derece saftı ki Goethe tanısa onunla mutlaka gurur duyardı.

Kitabının sayfaları akış örnekleriyle doluydu. Mississippi gibi büyük nehirler ve Fransa'daki Arcachon Havuzu** de-

*Su altı araştırmaları ve sinema çekimleriyle ünlü bir Fransız deniz subay oşinograf. (ç.n.)

Batı Fransa'da Gironde ilinde Atlantik Okyanusu boyunca dümdüz uzanan bir kıyı şeridindeki tek girinti, **Bassind' Arcachon'dur. (ç.n.)

nize doğru geniş kıvrımlarla menderesler oluşturarak akmaktadır. Denizin içinde ise Golfstrim akıntısı bir doğuya bir batıya kıvrılarak menderes şeklinde akmaktadır. Soğuk suların ortasında devasa bir sıcak su nehri olan Golfstrim, Schwenk'in ifadesiyle, "soğuk sulardan kendine kıyılar yapan"[9] bir nehirdir. Akış geçip gittiğinde ya da görünmez hale geldiğinde, akışın izleri kalır. Havanın oluşturduğu nehirler çölün kumları üzerinde izlerini bırakarak dalgaları gösterir. Gelgit akışında alçalan sular plajın kumlarına adeta damarlardan oluşmuş bir ağ kazır. Schwenk'in tesadüflerle işi yoktu. Evrensel ilkelere inanıyordu; hatta evrenselliğin de ötesinde tabiatta, söylemini insan şekline sokmuş belirli bir ruhun var olduğuna inanmıştı. "Modelinin temel ilkesi"[10] şuydu: Akış "çevresindeki materyelden tamamen bağımsız olarak kendini gerçekleştirmek ister."

Akıntılar içinde, ikinci derecede akıntılar olduğunu bilmektedir. Menderesli bir nehir halinde aşağı akan su, ikinci derecede, nehrin ekseni çevresinde bir kıyıya doğru, nehrin yatağından aşağı, sonra karşı kıyıya doğru, tekrar yüzeye yukarı, tıpkı bir donatın çevresinde sarmallaşan bir parçacık gibi akar. Herhangi bir su parçacığının bıraktığı izden oluşan helezon, diğer helezonların etrafına dolanır. Schwenk bu gibi şekillerde topologlara özgü bir hayalgücü sergiliyordu. "Bir helezon içinde birbirine dolanmış bükümleri gösteren bu resim ancak gerçek harekete oranla doğrudur. Sık sık su 'bükümleri'nden söz edilir; aslında bunlar tek tek bükümler değil, mekân içinde birbirine örülmüş ve her biri diğerini geçerek akan tüm yüzeylerdir."[11] Schwenk ritimlerin dalgalarda birbiriyle yarıştığını, dalgaların birbirinin üstünden atladığını, yüzeylerin bölündüğünü ve sınırlarda katmanlaştığını gördü. Anaforlar, vorteksler ve vorteks dizileri görüp bunları bir yüzeyin başka bir yüzey üzerinde "yuvarlanması" olarak yorumladı. Bir fizikçinin yaklaşan türbülansın dinamiğiyle ilgili yaklaşımına, Schwenk de bu noktada bir filozof kadar yakınlık duydu. Sanatçı kişiliği dolayısıyla varsayımlarına evrensellik hâkim oluyordu. Schwenk'in nazarında vorteksler istikrarsızlık, istikrarsızlık

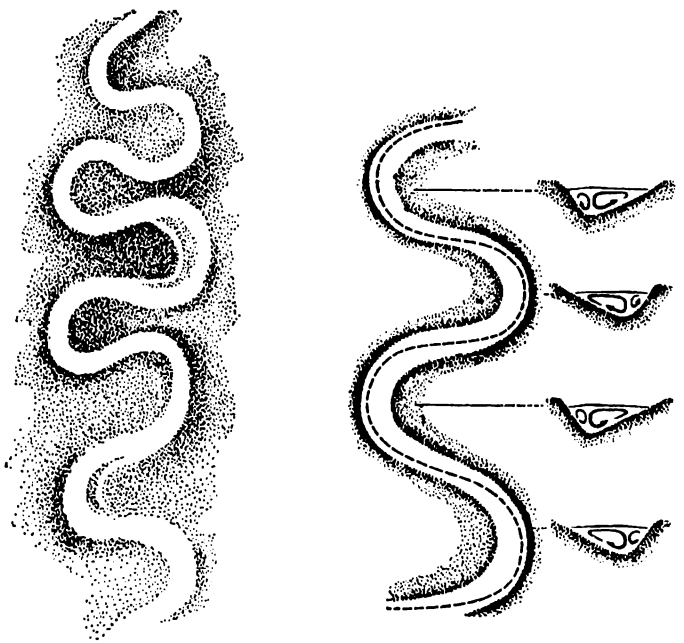
da bir akışın kendi içindeki bir eşitsizlikle mücadele etmesi demekti; üstelik eşitsizlik "temel modeldi." Anaforların yuvarlanması, eğrelti otlarının açılması, sıra dağların kıvrılması, hayvanlarda organların içinin boşalması gibi fenomenlerin hepsi, Schwenk'e göre tek bir yol izliyordu. Bu yolun özelliği olan herhangi bir ortamla ya da özelliği olan herhangi bir farklılıkla hiçbir ilişkisi yoktu. Eşitsizliklerin[12] yavaş ve hızlı, sıcak ve soğuk, yoğun ve seyrek, tuzlu ve tatlı, ağdalı ve akışkan, asit ve alkalin olması mümkündü. Sınırın geçtiği yerde, hayat filizlenmektedir.

Halbuki, hayat, D'Arcy Wentworth Thompson'un yetki sahasına giriyordu. Bu olağanüstü doğa bilimci 1917'de şöyle yazmıştı: "Bütün enerji yasaları da, maddenin bütün özellikleri de, bütün koloitlerin bütün kimyası da, ruhu anlamakta ne kadar aciz kalmışlarsa bedeni izah etmeye de güçleri muhtemelen o kadar yetersiz olacaktır. Ben kendi hesabıma, bunun olacağını sanmıyorum."[13] D'Arcy Thompson yaşamın incelenmesi alanına Schwenk'in bir türlü başaramadığı bir şeyi getirdi: Matematiği. Schwenk argümanlarını analojiye dayandırıyordu. Manevi, üretken, ansiklopedik niteliklere sahip olan tezi sonunda benzerliklerin sergilenmesinden ibaret kalmıştır: Schwenk'in görüşlerini ve yöntemini kısmen D'Arcy Thompson'un şaheseri, *Büyüme ve Forma Dair* adlı eserinde bulmak mümkündür. Modern okuyucular, birçok sivri uçlar halinde uzanarak düşen, kıvrım kıvrım sarmaşıklar gibi sarkmış sıvı damlacıklarını, kendilerine hayret edilecek derecede benzeyen canlı denizanasıyla yan yana gösteren titizlikle çizilmiş bu resimleri nasıl değerlendireceği konusunda gerçekten zorlanır. Bu sırf biraz zorlanmış bir tesadüf müdür? İki form birbirine benziyorsa mutlaka benzser nedenler mi aramak zorundayız?

D'Arcy Thompson meşru bilimin sınırları dışına atılmamış bilim adamları arasında etkisi en fazla olan biyologdur. Yirminci yüzyılda biyolojinin geçirdiği devrim D'Arcy Thompson'un yaşadığı dönemde de devam etmesine rağmen, onu tamamen atlayıp aşmıştır. D'Arcy Thompson'un kimya bilgisi yoktu; hücreyi yanlış anlamış, genetikte patlama de-

recesine varan gelişmeleri öngörememişti. Yazıları, kendi yaşadığı dönemde bile, bilimsel güvenilirliğinden şüphe ettirecek kadar klasik ve edebi - çok da güzel - mahiyette görünüyordu. Modern biyologların D'Arcy Thompson'u okumaları gerekmez. Fakat, en büyük biyologlar gene de onun kitaplarının cazibesinden kurtulamamıştır. Sör Peter Medawar, D'Arcy Thompson'un kitabını, "İngilizce dilinde yazılmış bütün bilim eserleri arasındaki en güzel bir edebi çalışma olarak, başka hiçbir kitapla karşılaştırılamaz,"[14] diye tanıtmıştır. Doğanın nesne şekillerinin sayısını sınırladığı konusundaki görüşü gittikçe güçlenen Stephen Jay Gould, bu görüşünün fikri düzeydeki temelini ancak D'Arcy Thompson'un kitabında bulabilmiştir. D'Arcy Thompson dışında çağdaş biyologların pek azı canlı organizmaların tekliği gibi inkâr edilemez bir yaklaşımı izlemiştir. Gould'un söylediği gibi, "Bütün paternleri tek bir üretici güçler sistemi haline indirgemenin mümkün olup olamayacağını sadece birkaç biyolog araştırmıştı. Yaşamın tekliğinin böyle bir kanıtının, organik formların bilimi için ne kadar önem taşıdığını hissedenler de birkaç kişiyi geçmez."[15]

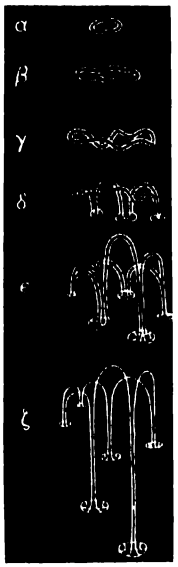
Bir koltuğa klasikliği, birçok dili, matematikçiliği, zoologluğu sığdıran D'Arcy Thompson hayatı bir bütün olarak görmeye çalıştığı sırada, biyoloji gayet verimli bir şekilde, her organizmayı, kendisini meydana getiren işlev sahibi kısımlara indirgeyen yöntemlere dönmekteydi. Redüksiyonizm galip geldi; en heyecanlı zaferini moleküler biyoloji alanında kazanmakla birlikte evrimden tıbba kadar diğer bütün alanlar da bundan nasibini aldı. Zarı, çekirdeği, sonra da proteinleri, enzimleri, kromozomları, eşeyli üremeyi anlamadan, insan hücreyi nasıl anlayabilirdi ki? Biyoloji nihayet, sinüslerin, retinaların, sinirlerin, beyin dokusunun iç mekanizmalarını ele almaya başladıktan sonradır ki kafatasının *şeklinin* neden böyle olduğunu düşünmenin artık ne zevki ne de anlamı kaldı. D'Arcy Thompson bu konuya ilgi gösterenlerin en sonuncusuydu. Uzun yıllar boyunca *sebep* üzerindeki dikkatli bir tartışmada, özellikle nihai sebep ile etkin ya da fiziksel sebep arasındaki fark konusunda nefes tüketerek dil

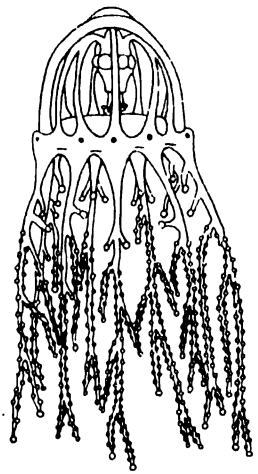


MENDERESLER VE SARMAL AKIŞLAR. Theodor Schwenk doğal akışların meydana getirdiği akıntıları, komplike ikincil hareketlere sahip bükümler olarak tasvir etmiştir. Yazısında, "Aslında bunlar tek tek bükümler değil, uzay içinde birbirine örülen yüzeylerdir. . . ." demiştir.

döken büyük biyologların da sonuncusuydu. Nihai sebep amaca ya da projeye dayalı olan sebeptir: Tekerlek yuvarlaktır, çünkü bu şekilde olması taşımayı mümkün kılar. Fiziksel sebep mekaniktir: Dünya yuvarlaktır, çünkü yer çekimi dönüş halindeki bir akışkan cismi küremsi bir cismin içine çeker. İkisi arasındaki fark her zaman açık ve seçik değildir. Bardak yuvarlaktır, çünkü bardağı tutmak ya da içindekini içmek için en rahat şekil budur. Bardak yuvarlaktır, çünkü çömlekçilikte ya da üflemeyle yapılan camcılıkta doğal olarak öngörülen şekil budur.

Tümü itibariyle bilimde, fiziksel sebep diğerlerinden üstün sayılır. Gerçekten, astronomi ve fizik dinin baskısından kurtulup gün ışığına çıkmaya başladığında, asıl sıkıntı ar-





AŞAĞI İNEN DAMLALAR. D'Arcy Wentworth Thompson suyun içinde aşağı inen mürekkep damlalarının (soldaki resim) ve denizanasının (sağdaki resim) meydana getirdiği iplik ve sütün görüntülerinin asılı kalışını göstermiştir. "İnanılmaz derecede acayip bir sonuç . . . bu damlaların fiziksel şartlara karşı . . . ne kadar duyarlı olduklarının gösterilmesidir. Aynı jelatini sürekli bir şekilde kullanmak ve akışkanın yoğunluğunu sadece üç ondalık basamağa kadar değiştirebilmek için, normal olarak asılı duran bir damladan gene normal olarak asılı olan fakat çatallanmış bir şekil gösteren bir damlaya kadar çeşit çeşit konfigürasyonlar elde ederiz . . . ."

gümanları tayin edilen amaca uygunluktan dolayı tasfiye etmekten dolayı meydana geliyordu; uzak görüşlü teleolojiden (dünya neyse odur, bu nedenle insan da ne yapıyorsa onu yapabilir) dolayı geliyordu da denebilir. Bununla birlikte, biyolojide Darwin, sebep hakkında düşünmenin merkezine teleolojiyi sağlamca yerleştirdi. Biyoloji dünyası belki de Tanrının tayin ettiği amacı yerine getirmeyebilir, fakat doğal ayıklanma olgusunun şekillendirdiği bir amacı yerine getirmektedir. Doğal ayıklanma genler veya embriyolarda değil, nihai üründe kendini gösterir. Bundan dolayı, adaptasyon görüşünü esas alan bir açıklama yapılırken bir organizmanın şekline ya da bir organın işlevine ilişkin olarak daima

sebebe bakılacaktır; ancak bu, fiziksel sebep değil nihai sebep olacaktır. Darwinci görüşün benimsendiği her yerde, bilimde nihai sebep ayakta kalır. Yamyamlık âdeti ya da kurban töresi üzerinde fikir yürüten çağdaş antropologlar doğru ya da yanlış, bunun hangi amaca hizmet ettiğini sorarlar. D'Arcy Thompson perşembenin gelişini çarşambadan anladı. Biyolojide fiziksel sebebin unutulmaması, yani mekanizma ile teleolojinin birlikte hatırlanması konusunda çok ısrarlı oldu. Kendini, yaşamı etkileyen matematiksel ve fiziksel kuvvetleri açıklamaya vakfetti. Adaptasyonculuk görüşü yerleşip tutundukça, bu gibi açıklamalar geçerliliğini kaybetti. Bir yaprağı izah ederken, doğal ayıklamanın güneş ışınlarını böyle etkinlikle toplayan bir yüzeye nasıl şekil verdiği şeklinde açıklamalar yapmak olgun ve dolgun bir problem haline geldi. Ancak çok daha sonraları, bazı bilim adamları doğanın açıklanmadan kalmış yönü üzerinde yeniden bulmacalar çözmeye başladılar. Yapraklar, tahayyül edilebilecek bütün yaprak şekilleri arasından çıkan birkaç şekilde meydana gelir; bir yaprağın şeklini işlevi zorla tayin etmez.

D'Arcy Thompson'un ispatlamayı istediği şeyleri ispatlaması için mevcut matematik bilgisi yeterli değildi. En iyi yapacağı şey, mesela, aynı aileye mensup canlıların kafataslarını çizip bunların üzerine birtakım koordinatlar işaretlemek ve basit bir geometrik transformasyon sayesinde bir kafatasının bir başka kafatasına dönüştüğünü göstermekti. Basit organizmalarda - fışkıran sıvıları, sıçrayan damlaları ve diğer birçok akış tarzlarını sanki onlara imrenircesine andıran şekilleriyle - yer çekimi ve yüzey gerilimi gibi fiziksel sebeplerden şüphe etti ki bunların, kendilerinden beklediği oluşturucu işlemleri gerçekleştirmesi hiç mümkün değildi. O halde, Albert Libchaber, akışkanlarla deneylerine başaldığında neden aklında *Büyüme ve Forma Dair* kitabı vardı?

Biyolojinin esas gelişme istikameti çerçevesinde, D'Arcy Thompson'un hayata şekil veren kuvvetler hakkındaki sezgileri en çok dinamik sistemler perspektifine yakın oldu. Hayata, her zaman hareket halinde, her zaman ritimlere - evrensel formları yarattığına inandığı "yerleşmiş büyüme ri-

timleri"ne[16] - karşı duyarlılık gösteren *hayat* gözüyle baktı. Kendi araştırmasını nesnelerin sırf maddi formlarını değil dinamiklerini de -"Enerjinin işlemlerinin, kuvvete ilişkin tanımlarla açıklanması"[17] - inceleyen bir eser olarak gördü. Matematikçi olarak, şekilleri kataloglamakla hiçbir şeyin ispat edilemeyeceğini biliyordu. Şair olarak da, tabiatı gözlediği uzun yıllar boyunca biriktirdiği şekillerdeki çarpıcı evrenselliğin ne rastlantı ne de amaç gerekçesiyle izah edilebileceğine inanmamak gerektiğini biliyordu. Bunun açıklamasını, kuvveti ve büyümeyi insan idrakinin dışında kalan birtakım yöntemlerle yöneten fizik yasaları yapabilirdi. Gene Platon. Maddenin kendine özgü, görülebilen şekillerinin arkasında adeta görünmez kalıplar olarak hizmet gören hayalet gibi formlar bulunmalıydı. Hareket halindeki formlar.

Libchaber yapacağı deney için sıvı helyumu seçti. Sıvı helyumun viskozitesi olmayacak kadar düşüktür; bu yüzden en küçük bir itmenin etkisiyle hemen yuvarlanır. Aynı deney, su ya da hava gibi orta viskozite derecesindeki bir akışkan içinde yapmaya kalkışılsa çok daha büyük bir kutuya ihtiyaç olacaktı. Düşük viskozite sayesinde, Libchaber'in deneyi sıcağa karşı çok daha duyarlı oluyordu. Milimetre enindeki hücresinin içinde konveksiyon meydana getirmek için taban ve tavan yüzeyleri arasında bir derecenin binde biri kadar sıcaklık farkı yaratması yeterli idi. Hücrenin bu kadar küçük yapılmasının sebebi buydu. Biraz daha büyük bir kutuda sıvı helyumun yuvarlanacağı yer daha büyük olduğundan, aynı hareketi elde etmek için gereken ısıtma çok daha az olacaktı. Bütün ölçüleri on kat daha büyük olan, üzüm tanesi büyüklüğündeki - bin kat daha fazla hacmi olan - bir kutuda konveksiyonun başlaması için bir derecenin milyonda biri kadar bir sıcaklık farkı yeterdi. Oysa sıcaklıktaki bu kadar küçük değişmeleri kontrol etmek mümkün olamayacaktı.

Deney cihazını planladıkları, tasarımını yaptıkları ve imal ettikleri sırada, Libchaber ve mühendisi ortada kargaşa sayılacak hiçbir şey bırakmamak için ellerinden geleni yaptılar. Gerçekte araştırmak üzere oldukları hareketi ortadan kaldırmak için ellerinden geleni yaptılar. Akışkanın

düzgün akıştan türbülansa kadar gelişen hareketine, uzay içindeki bir hareket olarak bakılır. Bu hareketin karmaşıklığı uzaydaki bir karmaşık gibi, pertürbasyonları ve vorteksleri de uzaydaki bir kaos gibi görünür. Libchaber ise zaman içerisinde ortaya değişim olarak çıkabilecek ritimleri araştırmaktaydı. Zaman, oynayacağı oyunun hem sahasıydı hem de kuralıydı. Uzayı sıkıştırıp neredeyse tek boyutlu bir noktaya kadar indirmişti. Kendisinden önceki araştırıcıların da kullanmış olduğu bir yöntemi en son sınırına kadar zorlamaktaydı. Kapalı mekândaki bir akışın - bir kutu içindeki Rayleigh-Bénard konveksiyonu veya bir silindir içindeki Couette-Taylor rotasyonu - açık mekânda, okyanustaki veya havadaki dalgalar gibi bir akışa göre, ölçülebilir derecede daha iyi davrandığını bilmeyen yoktu. Açık mekândaki akışta, sınır yüzeyi serbest kalır, karmaşık çoğalır.

Kenarları düz çizgili bir kutudaki konveksiyon sosis biçiminde - ya da bu deneyde olduğu gibi susam tohumlarına benzer - akışkan rulolar meydana getirdiği için Libchaber, hücresinin boyutlarını iki ruloya da tam yetecek kadar yer kalacak şekilde belirlemiştir. Sıvı helyum merkezde yükselmekte, yukarıda sola ve sağa ikiye bölünerek baş aşağı dönmekte ve hücrenin dış çeperlerinden doğru aşağıya inmektedir. Bu zorlama bir geometri anlayışı idi. Titreşimler sınırlandırılmıştı. Hücrenin hatlarının netliği ve oranların titizlikle seçilmiş olması sistemin dışından gelebilecek her türlü dalgalanmayı yok ediyordu. Libchaber zamanla oynayabilmek için mekânı dondurmuştu.

Azot banyosu içindeki havası alınmış kabın içindeki hücrenin içinde yuvarlanan helyumla deney başladığında, Libchaber'in içeride neler olup bittiğini bir şekilde görebilmesi gerekiyordu. Hücrenin üst yüzeyindeki safirin içine iki adet mikroskopik sıcaklık sondası yerleştirdi. Bu sondalardan gelen çıktılar bir kâğıt üzerine devamlı olarak çizilerek kaydediliyordu. Böylece sıcaklığı akışkanın tepesindeki iki ayrı noktadan izleyebiliyordu. Başka bir fizikçi, bu işlemi o kadar hassas, o kadar akıllı bulmuştur ki, bununla Libchaber'in doğayı kandırmayı başardığını bile söylemiştir.[18]

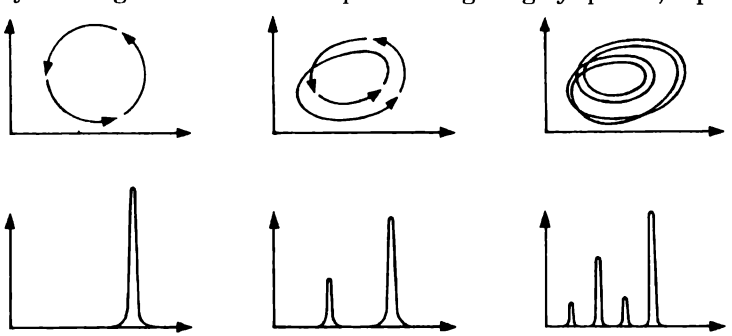
Dakiklik ve hassaslık nümunesi bu minyatür şaheseri tümüyle incelemek Libchaber'in tam iki yılını aldı, fakat, kendisinin de söylediği gibi, bu inceleme çok muazzam veya çok sofistike olmamakla birlikte, adeta yaptığı tablodaki son fırça darbelerini teşkil etmişti. Sonunda her şeyi gördü. Deneyini bıkmadan usanmadan saatler boyunca, gündüz gece demeden gerçekleştirdikten sonra türbülans eşiği ile ilgili olarak tasavvur ettiğinden çok daha çetrefilli bir davranış paterni buldu. Periyodu ikiye katlayan çağlayan tümüyle ortaya çıktı. Libchaber ısıtıldığı zaman yükselen bir akışkanın hareketini sınırladı ve içindeki bütün yabancı unsurlardan arındırdı. Tabandaki saf bakır levha, akışkanın durağan kalma eğilimini yenecek kadar ısınınca proses ilk dallanma ile yani, hareket eşiği ile başlar. Mutlak sıfırın birkaç derece üstüne çıkınca, bir derecenin binde biri bile yeterlidir. Alttaki sıvı ısınıp üstteki soğuk sıvıdan daha hafif hale gelinceye kadar genleşir. Sıcak sıvının yükselebilmesi için soğuk sıvının aşağı çökmesi gereklidir. İki hareketin meydana gelmesi için, sıvı kendini derhal yuvarlanan iki silindir şeklini alır. Silindirler sabit bir hıza ulaşır ve sistem bir dengede karar kılar - bu denge hareketli bir dengedir; ısı enerjisi düzenli olarak harekete dönüşmekte, sürtünme dolayısıyla sönerek tekrar ısı haline dönmekte ve tavandaki soğuk levhanın üzerinde dağılmaktadır.

Libchaber o ana kadar, akışkanlar mekaniği alanında çok iyi bilinen, çok iyi bilindiği için de fazla önemsenmeyen bir deneyi gerçekleştirmekteydi. "Bu klasik fizik olduğu için,"[19] diyordu, "maalesef eski sayılıyor, bu yüzden de ilginç bulunmuyordu." Aynı şekilde, deneyde tamamen Lorenz'in üç denklemli sistemiyle modellediği aynı akış araştırılıyordu. Ne var ki, gerçek dünyaya ilişkin bir deney - gerçek sıvı, bir teknisyeninin çeliği keserek yaptığı bir kutu, Paris trafiğinin etkisiyle titreşip duran bir laboratuvar - veri toplama görevini bilgisayarın başına oturup sadece rakam üretmekten çok daha sıkıntılı bir iş haline getirmişti bile.

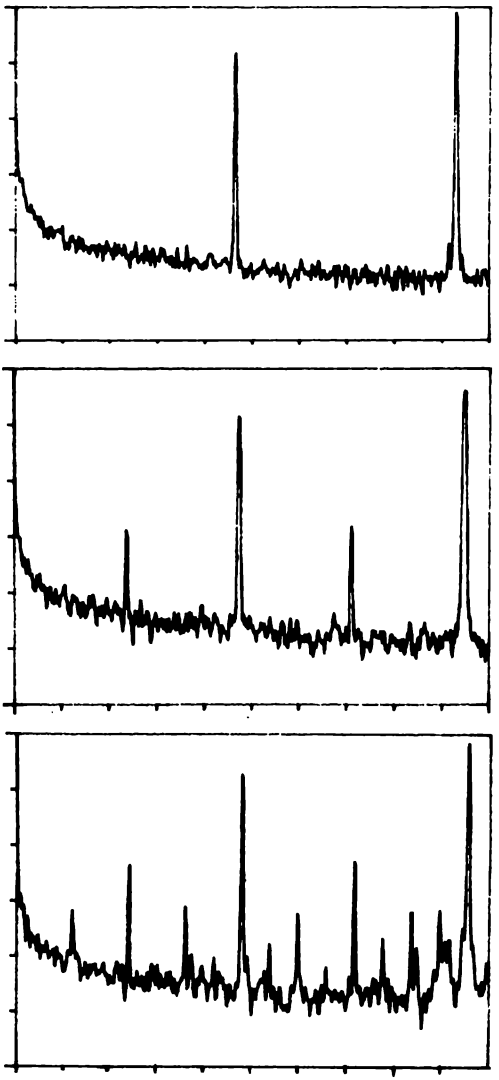
Libchaber gibi uygulamalı fizikçiler, üst yüzeyin içine yerleştirilmiş bir sonda ile ölçtükleri sıcaklığı kaydetmek için sondanın bağlı olduğu, bildiğimiz basit bir kalemi kullan-

mışlardır. İlk dallanmayı takip eden denge hareketinde her noktadaki sıcaklık, aşağı yukarı sabit kalmış ve kalem düz bir çizgi çizmiştir. Isıtma arttıkça sistemde istikrarsızlık oluşmaktadır. Her ruloda bir bozukluk meydana çıkmakta ve bu bozukluk düzenli bir şekilde bir ileri bir geri yer değiştirmektedir. Bu yalpalanma, sıcaklığın iki değer arasında aşağı yukarı değişmesi olarak tezahür etmektedir. Şimdi kalemin kâğıt üzerine çizdiği şekil dalgalı bir çizgi halindedir.

Deneydeki gürültü yüzünden devamlı olarak değişen ve çalkanan basit bir sıcaklık çizgisine bakıp yeni çatallanmaların ne zaman ortaya çıkacağını tahmin etmeye ya da bunların doğasını kestirmeye imkân yoktur. Bu çizgi, adeta borsanın yüksek ateşli günler yaşadığı dönemleri gösteren bir çizgideki gelişigüzelliğe benzer bir tarzda, hangi yöne doğru gidecekleri belli olmayan doruklar ve vadilerden geçmektedir. Libchaber bu verileri incelemek için hepsini bir spektrum grafiğine dönüştürerek sıcaklıktaki değişikliklerde saklı bulunan ana frekansları ortaya çıkarmaya çalışmıştır. Deneyden sağlanan verilerle spektrum grafiği yapmak, tıpkı



DALLANMAYI GÖRMENİN İKİ YOLU. Libchaber'in konveksiyon hücresi gibi bir deneyde muntazam bir salınım üretildiği zaman, bu salınımın faz uzayı portresi bir sarmal biçimini alarak düzenli aralıklarla kendini tekrarlamaktadır (üstte solda). Bu verilerdeki frekansları ölçmeye çalışan bir uygulamalı fizikçi bu basit ritim için ani ve güçlü bir yükseliş gösteren bir spektrum grafiği görecektir. Bir periyot katlanmasından (dallanma) sonra, bu sistem kendisini tam olarak tekrarlamadan önce iki kez sarmal yapar (ortada); şimdi de deneyci frekansın tam ortasında ilk baştaki ritmin yarısı kadar bir frekansta - periyodun iki katı - yeni bir ritim oluştuğunu görür. Yeni periyot katlanmaları spektrum grafiğini birçok dikmelerle doldurur.



TEORİYİ TEYİT EDEN GERÇEK VERİLER. Libchaber'in spektrum grafikleri teorinin öngördüğü periyot katlanması paternini çarpıcı bir biçimde, bütün dakikliğiyle göstermiştir. Yeni frekansların dikmeleri deneysel gürültünün üzerinde açık ve seçik olarak seçilmektedir. Feigenbaum'un boyutsuzluk teorisi sadece yeni frekansların ne zaman ve nerede ortaya çıkacağını öngörmekle kalmamış, bu frekansların ne kadar kuvvetli olacağını - genliklerini de öngörmeyi sağlamıştır.

bir senfonideki karmaşık bir akoru meydana getiren ses frekanslarının grafiğini yapmaya benzer. Kırık, karmaşık bir çizgi daima grafiğin tabanı boyunca koşturacaktır; bu deneydeki gürültüdür. Belli başlı tonlar grafikte dikmeler olarak görünür: Sesin tonu arttıkça dikmelerin yüksekliği de artar. Veriler dominant bir frekans, mesela, her saniyede bir tepe noktasına erişen bir ritim üretiyorsa bu frekans spektrum grafiğinde bir dikme olarak görünecektir.

Tesadüf bu ya, Libchaber'in yaptığı deneyde, ilk beliren dalgaboyu iki saniye kadardı. Bunu izleyen dallanma ince bir değişikliğe neden oldu. Rulo yalpalanmaya devam etti; bolometrenin gösterdiği sıcaklık da dominant bir ritimle yükselme ve düşmeyi sürdürdü. Tek çevrimlerde sıcaklık eskisine göre biraz daha yükselmeye başladı, çift çevrimlerde ise biraz düşük oldu. Gerçekte, maksimum sıcaklık ikiye bölünmüş, böylece birbirinden farkı iki maksimum ve iki minimum olmuştu. Kalem ucun çizdiği çizgiyi yorumlamak zor olmakla birlikte, yalpalanma sonucunda salınım üzerine salınım geliştirerek bir meta-salınım oluşturdu. Spektrum grafiğinde bunu daha açık bir şekilde görmek mümkündü. Sıcaklık hâlâ her iki saniyede bir yükseldiği için, eski frekans hâlâ orada bütün gücüyle mevcuttu. Buna rağmen, şimdi eski frekansın tam yarısı kadar yeni bir frekans beliriyordu, çünkü sistem her dört saniyede bir tekrarlanan bir öğeyi geliştirmiş bulunuyordu.[20] Dallanmalar devam ettikçe garip bir şekilde tutarlılık kazanan bir paterni diğer şeylerin arasından ayırt etmek mümkün oluyordu: Ortaya çıkan yeni bir frekans eski frekansın iki katı olduğundan, grafiği ilk frekansın dörtte biri, sekizde biri ve on altıda biri boyundaki frekanslarla doldurarak meydana getirdiği manzara, sırayla bir uzun bir kısa direklerden yapılmış bir tahta çiti andırıyordu.

Bir veri hengâmesi içinde gizli formlar arayan bir kimse için bile, bu minik hücrenin alışkanlıkları açık ve seçik olarak belli oluncaya kadar deneyin onlarca, sonra da yüzlerce kez tekrarlanması gerekiyordu. Libchaber ve yardımcısı mühendis sıcaklığı yavaşça arttırır ve sistem bir dengeden başka bir dengeye geçip yerleşirken her an akla gelmeyecek ge-

lişmelerin ortaya çıkması mümkündü. Bazen, kalıcılığı olmayan frekanslar beliriyor, spektrum grafiği boyunca yavaşça ilerledikten sonra kayboluyordu. Bazen de, cihazın geometrisindeki netliğe rağmen, iki yerine üç rulo oluşuyordu - peki ama, bu minicik hücrenin içinde neler olup bittiğini gerçekte nasıl bilebileceklerdi?

O zamanlar, Libchaber'in Feigenbaum'un evrensellik buluşundan haberi olsaydı deneyindeki dallanmaları nerede arayacağını ve bunlara ne isim takacağını gayet iyi bilecekti. 1979'a gelindiğinde, Feigenbaum'un yeni teorisine ilgi gösteren bir grup matematikçi ve matematik eğilimli fizikçinin sayısı artmaya başlamıştı. Buna karşılık, gerçek fiziksel sistemlerin sorunlarına aşina olan fizikçilerin çoğunluğu, bu konuda bir hükme varmakta tereddüt ediyor ve bunun için haklı nedenleri olduğuna inanıyorlardı. Tek boyutlu sistemlerde, May ve Feigenbaum'un fonksiyonlarındaki karmaşıklığı anlamak kolaydı. Ancak, bir mühendisin elinden çıkan mekanik bir cihazın iki veya üç ya da dört boyutlu sistemlerindeki karmaşıklık bambaşka bir şeydi. Bunlar için sadece basit fark denklemleri değil, ciddi diferansiyel denklemler gerekliydi. Kaldı ki, alçak boyutlu sistemleri akışkanların akış sistemlerinden ayıran başka bir uçurum daha var gibi görünüyordu ki, fizikçiler bunu potansiyel olarak sonsuz boyutlu sistemler olarak gördüler. Libchaber'in yaptığı hücre gibi bu kadar titizlikle imal edilmiş bir yapıda bile hemen hemen sonsuz sayıda akışkan parçacıkları bulunuyordu. Her parçacık, en azından potansiyel bir bağımsız hareket demekti. Bazı şartların bir araya gelmesi halinde, her parçacığın yeni birtakım büküm ya da vortekslerin geometrik merkezi haline gelmesi mümkündü.

New Jersey'deki AT&T Bell Laboratuvarlarında çalışan Pierre Hohenberg, "Böyle bir sistemdeki gerçek temel hareketin tamamen fonksiyonların asıl unsuru haline dönüşmesini anlayan bir tek kimse bile çıkmadı,"[21] diyordu. Hohenberg yeni teoriyi ve yeni deneyleri bir arada değerlendirebilen ender fizikçilerden biri olmuştur. "Feigenberg bunu hayal etmiş olabilir, ama şurası muhakkak ki bunu hiç söyle-

medi. Feigenbaum'un çalışmalarının asıl konusu dönüşümlerdi. Bir fizikçi dönüşümlerle neden uğraşsın ki? Çünkü bu bir oyundur. Gerçekten de, fizikçiler dönüşümlerle oynamaktan başka bir şey yapmadığı sürece, bunun, bizim kavramayı istediğimiz şeyden daha uzaklaştığını görüyoruz.

"Fakat deneylerde de görülmeye başlandığında, hakikaten çok heyecan duymaya başlarsınız. İşte gerçek mucize budur: *İlginizi çeken* sistemlerdeki davranışı, ancak serbestlik derecesi sayı itibariyle çok az olan bir modelle anlayabilirsiniz."

Teorik fizikçi ile uygulamalı fizikçiyi sonunda bir araya getiren Hohenberg olmuştur. 1979 yazında Aspen'de yönettiği bir seminere Libchaber de katılmıştı. (Bundan dört yıl önce, yazları düzenlenen aynı seminerde, Feigenbaum'un dinlediği Steve Smale de konuşmasında, matematikçiler belirli bir denklemde kaosa geçişi izlerken adeta mantar gibi biten bir sayıdan - sadece bir tek sayıdan - bahsetmişti.) Libchaber sıvı helyumla yaptığı deneyleri anlatırken Hohenberg not alıyordu. Seminerden dönüşte, Hohenberg'in içinden New Meksiko'ya uğrayıp Feigenbaum'u görmek geldi. Bundan bir süre sonra da Feigenbaum Paris'te Libchaber'i ziyarete gitti. Libchaber'in darmadağınık laboratuvarındaki cihazların ortasında durup konuştular.[22] Libchaber minik hücresini iftiharla gösterip Feigenbaum'dan son teorisini açıklamasını rica etti. Sonra da dışarı çıkıp Paris'in sokaklarında en iyi kahve içilen bir yer aramaya başladılar. Libchaber hem bu kadar genç hem de kendi ifadesiyle, bu kadar *hayat dolu* bir teorik fizikçi tanımış olmanın kendisi için ne hoş bir sürpriz teşkil ettiğini sonraları hep hatırlamıştır.

Dönüşümlerden akışkanların akışına geçerken atılan adım, o kadar büyük bir adım hissi verir ki, en ciddi bilim adamları bile bazen bunun bir hayal olduğunu düşünmüşlerdir. Doğanın böylesine bir karmaşıklığı bu denli sadelikle nasıl bağdaştırabildiği akıl sır erecek şey değildi. Jerry Gollub, "'Bunu teoriyle uygulama arasındaki normal ilişki sanmayın; bu bir tür mucize gibi bir şey,"[23] diyordu. Gollub'un mucize dediği şey, birkaç yıl içinde artık laboratuvardan laboratuvara dolaşan bir efsane haline gelmişti:[24] Akışkan

hücrelerinin boyutları büyümüş, deneylerde su ve cıva, elektronik salınıcılar, lazerler, hatta kimyasal reaksiyonlar kullanılır olmuştu. Teorik fizikçiler Feigenbaum'un tekniklerini benimsemiş ve kaosa çıkan başka matematiksel yollar da bulmuştu ki, bunlar periyot katlanmasına çok yakın olan intermitensi ve tıpkı-periyodiklik gibi paternlerdi. Bu paternlerin evrenselliği de hem teori hem uygulama bakımından kanıtlanmıştır.

Uygulamalı fizikçilerin buluşları, bilgisayar destekli deney çağının başlamasına öncülük etmiştir. Fizikçiler bilgisayarların tıpkı gerçek deneylerdeki kadar kaliteli resimler ürettiğini keşfetmiş ve bu resimleri milyonlarca kez daha hızlı ve güvenilir şekilde üretmişlerdir. Birçok fizikçiye göre, Libchaber'in elde ettiği sonuçlar önemli olmakla birlikte, İtalya'daki Modena Üniversitesinden Valter Franceschini'nin icat ettiği bir akışkan modeli çok daha ikna edici kanıtlar içeriyordu;[25] bu model beş diferansiyel denklemli bir sistemin çekiciler ve periyot katlamaları üretmesine dayanıyordu. Franceschini'nin Feigenbaum'dan hiç haberi yoktu; ne var ki, geliştirdiği çok boyutlu karmaşık model, Feigenbaum'un tek boyutlu dönüşümlerde bulduğu sabit değerlerle aynı değerleri veriyordu. 1980 yılında, Avrupalı bir grup[26] araştırıcı daha ikna edici bir matematiksel açıklama getirdi: Birbiriyle çatışma halindeki birçok hareketten oluşan karmaşık bir sistemin gücü sönüm yüzünden azalmakta ve sonuçta birçok boyutun davranışı bir tek boyut davranışına indirgenmektedir.

Bilgisayarlar dışında, akışkan deneylerinde bir garip çekici bulmak kolay bir iş değildi. Bu konu Harry Swinney gibi uygulamalı fizikçileri 1980'li yıllara kadar meşgul etti. Uygulamalı fizikçiler sonunda başarıya ulaştığında ise bilgisayar alanında uzmanlaşan yeni birtakım araştırıcılar uygulamacıların elde ettikleri sonuçları küçümsedi ve bu sonuçları, bilgisayarcılar tarafından grafik yetenekli terminallerde üretilmekte olan ayrıntılı resimlerin kaba, öngörülebilir yankıları olarak nitelediler. Bilgisayarla yapılan bir deneyde, binlerce veya milyonlarca veri noktası ürettiğinizde, şe-

killer az çok belirgin hale gelir. Laboratuvarda ise tıpkı gerçek hayatta olduğu gibi, yararlı enformasyonun gürültüden ayırt edilebilmesi gereklidir. Bilgisayarlı deneyde veriler sihirli pınarlardan akan billurlar gibidir. Laboratuvar deneyinde her bir damlayı elde edinceye kadar canınız çıkar.

Buna rağmen, Feigenbaum'un ve diğer bazı kimselerin ortaya attığı yeni teorilerin bilim camiasında yarattığı ilgi halesinin temelinde kanıt olarak, sadece bilgisayar deneylerinin bulunduğunu sanmak yanlış olur. Nonlineer diferansiyel denklem sistemlerini sayısallaştırmak için gerekli olan değişiklikleri yapma, uzlaşmalara varma, yaklaşık değerler alma işlemlerine kuşku ile bakılıyordu. Simülasyonlar gerçeği parçalara ayırıyor, bu parçaların sayısı ne kadar çoğaltılsa gene de hep yetersiz kalıyordu. Bilgisayar modelleri, programcıların tercihlerine göre keyfi olarak seçilmiş birtakım kurallardan ibaretti. Gerçek dünyadaki akışkanlar bir kenarı bir milimetre olan hücreler içine kapatılsa bile, bu akışkanların bünyesinde, doğal düzensizlikten doğan başıboş, azgın hareket inkâr edilmesi imkânsız bir potansiyel olarak mevcuttur. Akışkanların içinde, sürpriz yaratma potansiyeli de vardır.

Bilgisayarlı simülasyon çağında, jet türbinlerinden kalp kapakçıklarına kadar akış namına ne varsa hepsi süper bilgisayarlarda modellenirken, doğanın uygulamalı bir fizikçinin aklını ne kadar kolay karıştırabileceğini hatırlamakta güçlük çekilir. Gerçekte, günümüzde hiçbir bilgisayarın, Libchaber'in sıvı helyum hücresi kadar basit bir sistemi bile tamamen simüle etmesi mümkün olamaz. İyi bir fizikçi bir simülasyonu incelerken, gerçeğin herhangi bir kırıntısının dışarda bırakılıp bırakılmadığını, kenarda köşede potansiyel bir sürpriz ihtimali kalıp kalmadığını sorgulamak zorundadır. Libchaber simüle edilmiş bir uçakta uçmak istemediğini, çünkü aklının, acaba neyin unutulduğunda ya da neyin ihmal edildiğinde kalacağını söylemekten hoşlanırdı. Dahası, bilgisayar simülasyonlarının sezgi oluşturmak ya da hesaplarda derinlik sağlamak bakımından yararlı olduğunu, fakat bu simülasyonlardan orijinal buluşlar çıkmadığını da söylerdi. Doğrusu, uygulamalı fizikçinin temel ilkesi işte budur.

Libchaber'in deneyi o kadar kusursuz, bilimsel hedefleri de o kadar soyuttu ki, birçok fizikçinin gözünde Libchaber'in çalışmaları konu itibariyle fizikten ziyade felsefeye veya matematiğe daha yakındı. Buna karşılık Libchaber, çalışma alanında geçerli olan kuralların redüksiyonist olduğuna, atomların özelliklerine öncelik tanıdığına görüşünü muhafaza etti. "Bir fizikçi bana gelip şunları sorsa:[27] 'Bu atom buraya nasıl gelir, oraya nasıl yapışır? Ya bu yüzeydeki duyarlılık nedir? Hem sen bu sistemin Hamilton denklemini yazabilir misin?'

"Ben de ona, 'Bana ne bunlardan, beni ilgilendiren tek şey bu *şekildir*; şeklin matematiği ve evrimidir; bu şekilden o şekle, o şekilden şu şekle dallanmasıdır, dersem bana şunu söyleyecektir: 'Senin yaptığının fizikle hiçbir alâkası yok, sen matematik yapıyorsun.' Bugün bile bana söyleyeceği budur. Peki o zaman ben ne cevap vereceğim? Evet, doğru, matematik yapıyorum. Ama çevremize en uygun olanı da budur. Doğada da budur."

Libchaber'in bulduğu paternler gerçekten de soyuttu. Matematikseldi. Bu paternlerden sıvı helyumun veya bakırın özellikleri ya da atomların mutlak sıfır civarında davranış biçimleri hakkında hiçbir sonuç çıkarmak imkânı yoktu. Ne var ki, bunlar Libchaber'den önce bu konuya kafa yoran mistik bilim adamlarının rüyalarında gördükleri paternlerin ta kendisiydi. Bu paternlerin deney alanına bilimsel itibar kazandırması sayesinde, kimyacısından elektrik mühendisine kadar birçok bilim adamı kısa sürede araştırma âlemine adım atmış ve hareketin yeni öğelerini araştırmaya başlamıştır. Birinci periyot katlanmasını, sonra onu izleyen ikincisini, arkasından bir sonrakini izole edecek kadar sıcaklığı arttırmayı başardığı daha ilk anda bu paternler görünmeye başlamıştır. Yeni teoriye göre, dallanmaların dakik bir boyutsuzluğa sahip bir geometri oluşturması gerekiyordu; zaten Libchaber'in gördüğü de tamamen buydu; Feigenbaum'un evrensel sabit değerleri o andan itibaren matematiksel bir ideal olmaktan çıkıp fiziksel, ölçülebilir ve yeniden üretilebilir bir gerçek haline geliyor-

du. Libchaber birbirinin peşi sıra çıkan dallanmalar gibi ürkütücü bir manzaraya şahit olmanın, sonra da gayet dolgun bir yapıya sahip sonsuz bir çağlayan gördüğünün bilincine varmanın verdiği bu duyguyu çok zaman sonra hâlâ hatırlamaya devam etti. Hatta, bunun kendisini eğlendirdiğini söylüyordu.

Kaostan Görüntüler

Daha ne amacı olabilir ki, kaosun
çekmekle bütün güçleri içine doğru
Tek bir yaprağa şekil verebilmekten başka.

CONRAD AIKEN

Michael Barnsley, Mitchell Feigenbaum'la 1979 yılında Korsika'daki bir konferansta karşılaştı.[1] Oxford'dan mezun bir matematikçi olan Barnsley evrenselliği, periyot katlanmasını ve sonsuz dallanma çağlayanlarını orada öğrendi. Bunun çok iyi bir fikir olduğunu, aslında bilim adamlarını nalıncı keseri gibi muhakkak kendilerine bir şeyler yontmaya koşuşturacak cinsten bir fikir olduğunu kendi kendine düşündü. Bakılırsa Barnsley de başka kimsenin farkına varmadığı bir şeyi gördüğünü düşünüyordu.

Feigenbaum'un bulduğu şu 2'li, 4'lü, 8'li, 16'lı çevrimler nereden geliyordu? Matematiksel bir yokluktan sihirli bir değnekle dokunulmuş gibi birdenbire ortaya mı çıkıyorlardı, yoksa o yokluktan bile daha derin bir şeyin bir gölgesinin geçtiğinin işaretlerini mi veriyorlardı? Barnsley'nin sezgisi, bu çevrimlerin, o zamana kadar bilim adamlarının gözünden kaçmış olan muazzam bir fraktal nesnenin bir bölümünü teşkil ettiğini fısıldıyordu.

Barnsley'in bu düşüncesini ifade edebilmek için yararlandığı bir çerçeve vardı; bu çerçeve kompleks düzlem olarak bilinen sayısal alandı. Kompleks düzlemde, eksi sonsuzdan sonsuza kadar bütün sayılar - yani, bütün gerçek sayılar - batının ucundan gelip 0 noktasında merkezden geçtikten sonra doğunun ucuna kadar uzanan bir doğrunun üzerinde

dizilmektedir. Ne var ki bu doğru, kuzeyde ve güneyde de sonsuza kadar uzanan bir dünyanın ekvator hattından başka bir şey değildir. Her sayı iki bölümden meydana gelir, bir *gerçek* bölümü vardır; bu bölüm doğu-batı enlemine tekabül eder; bir de *hayali* bölümü vardır ki, o da kuzey-güney boylamına tekabül eder. Var olan bir mutabakat gereği, bu kompleks sayılar şu şekilde yazılır: $2 + 3i$; burada i hayali bölümü ifade eder. Bu iki bölüm, her sayının bu iki boyutlu düzlemdeki tek adresini teşkil eder. Böylece, gerçek sayıların bulunduğu orijinal doğru, hayali bölümü sıfıra eşit olan sayıların kümesidir ki bu da tamamen özel bir durumdur. Kompleks düzlemde sadece gerçek sayılara - sadece ekvator üzerindeki sayılara - baktığınız takdirde görüş açınızı daraltarak birbiriyle rasgele kesişen şekillere indirgemiş olursunuz; halbuki iki boyutta baktığınız zaman bu şekillerin diğer bazı sırlarını çözmüş olabilirdiniz. İşte Barnsley'in kuşkuyla baktığı konu bu idi.

Gerçek ve *hayali* kavramları normal sayıların bu yeni hibritten daha gerçek göründüğü bir zamandan kalmadır; buna rağmen, her iki tür sayı da başka bütün sayılar kadar gerçek ve hayali olduğundan, bu isimler şimdiye kadar oldukça keyfi bir tanımlamayı ifade etmiştir. Tarihi gelişmesine bakılırsa hayali sayılar şu sorudan kaynaklanan kavramsal bir boşluğu doldurmak için icat edilmiştir: Negatif bir sayının kare kökü ne olur? Standart kabule göre, -1'in kare kökü i, -4'ün kare kökü $2i$ olarak böyle devam eder. Gerçek ve hayali sayıların çeşitli şekillerde bir araya getirilmesi suretiyle, polinom denklemli yeni tür hesaplamalar yapma imkânı doğduğunun anlaşılması çok sürmedi. Kompleks sayılar toplanabilir, çarpılabilir, ortalaması alınabilir, faktorize edilebilir, integrali alınabilir. Gerçek sayılarla yapılan bütün işlemleri kompleks sayılara uygulamak mümkündür. Feigenbaum'un fonksiyonlarını kompleks düzleme çevirmeye başlayan Barnsley, akılları durduran bir cins şekillerin anahatlarıyla belirmeye başladığını görmüştür; bu şekiller uygulamalı fizikçiler için muamma teşkil eden dinamik fikirlerle ilişkili görünmesine rağmen, matematiksel inşalar olarak da çok şaşırtıcı niteliktedir.

Barnsley, neticede bu çevrimlerin hiç yoktan var olmadıklarının farkına vardı. Kompleks düzlemden gerçek doğruya düşüyorlardı; bakarsanız kompleks düzlemde her düzeyden bir grup çevrim vardır. Her zaman da gerçek doğruya varıncaya kadar görünmez durumda dalgalanan bir iki periyot çevrimi, bir üç periyot çevrimi, bir dört periyot çevrimi mevcut olagelmiştir. Barnsley Korsika'dan hızla Georgia Institute of Technology'deki (Georgia Teknoloji Enstitüsü) bürosuna döndü ve hemen bir makale yazdı. Makalesini, yayınlanmak üzere, *Communications in Mathematical Physics* adlı dergiye postaladı. Derginin editörü, tesadüf bu ya, David Ruelle idi; Ruelle'in cevabı ise pek iç açıcı değildi. Barnsley bir Fransız matematikçisinin elli yıl önce keşfettiği ve o zamandan beri hafızalardan silinmiş olan bir buluşu, farkında olmadan yeniden keşfetmişti. Barnsley sonradan hatıralarını anlatırken bu olaydan şöyle bahsetmiştir: "Ruelle makaleyi sanki eli ateşe değmiş gibi bana geri gönderdi ve 'Michael,' dedi, 'sen Julia kümelerinden bahsetmişsin.' "[2]

Ruelle sözlerini bir de tavsiye ile bağlamıştı: "Mandelbrot'la temas et."

John Hubbard, iddialı renkli ve desenli gömlekler giymeye meraklı bir Amerikalı matematikçi idi;[3] üç yıl önce, Fransa'da Orsay'de üniversite birinci sınıf öğrencilerine temel analiz öğretiyordu. Anlattığı standart konular arasında Newton metodu da vardı; bu klasik yöntemle ardışık olarak daha iyi yaklaşık değerler alınarak denklemler çözümleniyordu. Oysa Hubbard standart konulardan sıkılmış ve Newton'un yöntemini bir kez de, öğrencilerin düşüncesini zorlayacak şekilde anlatmayı aklına takmıştı.

Newton'un yöntemi eski bir yöntemdir; üstelik Newton bu yöntemi icat ettiğinde de zaten eski idi. Eski Yunanda kare kök bulmak için bunun başka bir versiyonu kullanılırdı. Yöntem bir tahminle başlar. Bu tahmin daha iyi bir tahmin yapılmasını sağlar; dinamik bir sistemin kararlı durumuna geçmeye çalışmasında olduğu gibi, tekrarlama süreci sayesinde bir cevap üzerinde yoğunlaşılır. Bu hızlı bir süreçtir; genelde, doğru ondalık basamakların sayısı her adımda kat-

lanarak artar. Tabii ki, bugünlerde, kare kökler daha analitik yöntemlerin karşısında tutunamamaktadır; aynı şekilde, ikinci dereceden bütün polinomyal denklemlerin - yani, değişkenlerin sadece ikinci kuvvete yükseltildiği denklemlerin - kökleri de bundan daha farklı değildir. Ne var ki, Newton'un yöntemi doğrudan doğruya çözülmesi mümkün olmayan daha yüksek dereceli polinomyal denklemlerde geçerlidir. Üstelik, her zaman olduğu gibi, bilgisayarın en güçlü yanı iterasyon yeteneği olduğu için, çeşitli bilgisayar algoritmalarında da gayet iyi sonuçlar vermektedir. Newton metodunun küçük bir zaafı, özellikle karmaşık çözümler bahis konusu olduğunda, denklemlerin genellikle birden fazla çözümü olmasıdır. Yöntemin *hangi* çözümü bulacağı konusunu başlangıçta yaptığınız tahmin belirler. Uygulamada öğrenci bunu bir problem olarak görmez bile. İşe nereden başlayacağınız hakkında genellikle iyi bir fikriniz vardır; yaptığınız tahminin yanlış çözüme doğru yakınsadığını hissederseniz, hemen başka bir yerden başlarsınız.

İnsanın aklına şu soru da gelebilir: Newton'un yöntemi kompleks düzlemde ikinci derece polinomyal bir köke doğru sarmallaşırken ne gibi bir yol izlemektedir? Geometri açısından cevap verirseniz, bu yöntemde sadece, iki kökten hangisinin başlangıçta yapılan tahmine daha yakın olduğunun araştırıldığını söyleyebilirsiniz. Orsay'da bir gün bu soru ortaya atıldığında, Hubbard da öğrencilerine aynen böyle söylemişti.

"Şimdi, mesela, üçüncü derece denklemler için durum daha karmaşık gibi görünmektedir,"[4] dedikten sonra kendinden emin bir tarzda şu sözleri eklemişti: "Ben bunun üstünde biraz düşüneyim; haftaya size anlatırım."

Hubbard öğrencilerine iterasyonun nasıl hesaplanacağını öğretmenin hâlâ en zor şey olduğunu; başlangıçtaki tahmini yapmanın ise kolay olacağını varsayıyordu.[5] Ancak, bu konu üzerinde düşündükçe, akıllıca yapılacak bir tahminin nelerden meydana geldiği, ya da Newton yönteminin bu konuda gerçekte ne yapabildiği gibi hususlarda daha az şey bildiğini gördü. Geometrik tahminin en iyi bilinen yolu, düzlemi üç-

gen şeklinde üç eşit pasta dilimine, her dilimde bir kök bulunacak biçimde bölmekti; ancak Hubbard bunun böyle yapılamayacağını gördü. Sınır bölgelerinde garip şeyler meydana geliyordu. Kaldı ki, Hubbard şaşırtıcı derecede zor olan bu sorun üzerinde takılıp kalan ilk matematikçi olmadığının da farkına vardı. 1879'da, Arthur Cayley kolayca çözümlenebilen bir ikinci derece probleminden çözümlenemezlikte ürkütücü boyutlara varan bir üçüncü derece problemine geçmeyi denemişti. Oysa, yüzyıl sonra Hubbard'ın elinde Cayley'de bulunmayan bir araç da vardı.

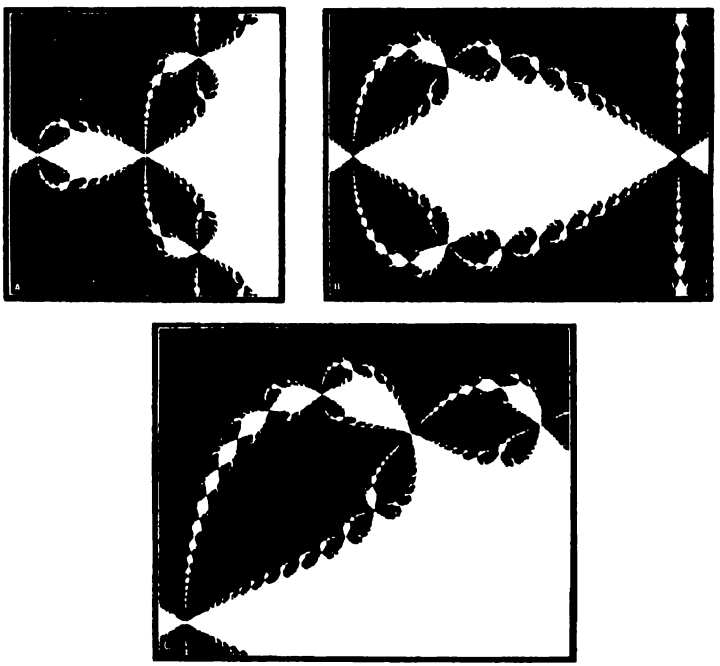
Hubbard tahminleri, yaklaştırmaları, kanıt yerine sezgiye dayalı yarı gerçekleri küçümseyen sert ve katı matematikçilerin neslindendi. Edward Lorenz'in çekicisi literatüre girdikten yirmi yıl sonra bile, bu denklemlerin bir garip çekicinin doğmasına neden olup olmadığını hiç kimsenin gerçekten *bilmediğini* hâlâ inatla iddia eden matematikçilerdendi. Hubbard'ın gözünde bu kanıtlanmamış bir tahminden ibaretti. Herkesin artık iyice tanıdığı bu çifte spiralin bir kanıt olmayıp sadece bir belirti olduğunu, bilgisayarlar tarafından çizilen bir şey olduğunu söylüyordu.

Şimdi ise Hubbard, kendini de inkâr edercesine ortodoks tekniklerle yapılamayanı yapmak üzere bilgisayar kullanmaya başlamıştı. Bilgisayarın hiçbir şey *ispat etmesi* beklenmemeliydi. Ancak, hiç olmazsa gerçeğin üstünü örten perdeyi aralayarak matematikçinin neyi kanıtlaması gerektiği hakkında kendisine fikir verebilirdi. Hubbard böylece deneylerine başladı. Newton yöntemini problem çözmek için bir araç olarak kullanmak yerine, doğrudan doğruya problemin kendisi olarak ele aldı. Hubbard üçüncü derece bir polinomun en basit örneği olarak, $x^3 - 1 = 0$ denklemini inceledi. Yani, 1'in küp kökü bulunacaktı. Tabii ki, gerçek sayılarla çözümlerin en alelâde olanını bulabilirsiniz: 1. Ne var ki, polinomun iki de karmaşık çözümü vardır: birincisi, $-1/2 + i\sqrt{3}/2$; ikincisi de $-1/2 - i\sqrt{3}/2$'dir. Kompleks düzlem üzerinde işaretlendiğinde, bu üç kök eşitkenar bir üçgen meydana ge-

tirir; bu üçgenin bir noktası saatin üçü gösterdiği yerde, bir noktası yediyi gösterdiği yerde, bir noktası da on biri gösterdiği yerde bulunur. Çıkış noktası olarak karmaşık bir sayı alındığında, sorun, Newton yöntemiyle bu üç çözümden hangisine ulaşılabileceğini görmekten ibaret kalıyordu. Sanki Newton yöntemi dinamik bir sistem; üç çözüm de üç çekici idi. Ya da sanki kompleks düzlem üç derin vadiye doğru eğimle inen düzgün bir yüzeydi. Düzlem üzerindeki herhangi bir noktadan hareket eden bir bilye vadilerden birine yuvarlanacaktı - iyi de hangisine?

Hubbard düzlemi oluşturan sonsuz sayıdaki noktaları örneklemeye girişti. Bilgisayarı bir noktadan öbür noktaya dolaşırken, her nokta için Newton yönteminin akışını hesaplıyor ve sonuçları renkli olarak veriyordu. Çözümlerden birine ulaştıran çıkış noktalarının hepsi mavi renkteydi. İkinci çözüme ulaştıran noktalar kırmızı, üçüncü çözüme ulaştıran noktalar ise yeşil renkliydi. Kabaca aldığı yaklaşık değerlere bakınca, Newton yöntemindeki dinamiğin düzlemi gerçekten üçgen biçiminde üç dilime böldüğünü buldu. Genellikle, belirli bir çözüme *yakın* olan noktalar hızla o çözüme doğru yöneliyordu. Bilgisayarla yapılan sistematik araştırma bu akışın altında komplike bir organizasyonun yattığını gösterdi; ancak buradaki bir noktadan sonra oradaki bir noktayı hesaplayabilen daha önceki matematikçilerin bunu görmesi kesinlikle mümkün değildi. Başlangıçta yapılan tahminlerden bazıları hızla belirli bir köke doğru yakınsarken, diğer bazıları da başka bir çözüme doğru yakınsamadan önce etrafta gelişigüzel bir biçimde sıçrıyordu. Bazen noktalardan biri, üç çözümden hiçbirine erişemeden, sonsuza kadar tekrarlanan bir çevrimin - periyodik bir çevrimin - içine düşmüş gibi görünüyordu.

Hubbard uzayı daha ince ayrıntılarıyla araştırmak üzere bilgisayarını zorlayınca, hem kendi hem de öğrencileri belirmeye başlayan resim karşısında hayretler içinde kaldılar. Mesela, mavi ve kırmızı vadiler arasında net bir sınır çizgisi yerine, kolyeye dizili inciler şeklinde yeşil lekeler gördü.



SONSUZ KOMPLEKSLİĞİN SINIRLARI. Bir pasta üç dilime bölündüğü zaman, dilimler tek bir noktada birbirine değer, iki dilim arasındaki sınırlar da basittir. Ne var ki gerek soyut matematiğin proseslerinden birçoğu gerekse gerçek dünyanın fiziği hemen hemen akıl almayacak derecede kompleks olan sınırlar yaratmaktadır.

Yukarıdaki resimde, Newton'un yöntemi -1'in küp kökünü bulmak için tatbik edilmiş ve düzlemi birbirine tıpkı benzeyen üç bölgeye bölmüştür; bu bölgelerden biri beyaz bırakılmıştır. Beyaz noktaların hepsi en büyük beyaz alanda bulunan köke doğru "çekilmektedir"; siyah noktaların hepsi diğer iki kökten birine doğru çekilmektedir. Sınırın özelliği, üzerindeki her noktanın üç bölgeyle de ortak sınırı bulunmasıdır. Çerçeve içindeki resimlerden de görüldüğü gibi, büyütülmüş parçalar fraktal bir yapının varlığını ortaya koyarak temel şekli gittikçe küçülen ölçeklerde tekrarlamaktadır.

Sanki birbirinin yanı başındaki iki vadi birbiriyle çekişerek bir bilyeyi içlerine çekmeye çalışıyor, bilye ise ikisine de girmeyip en uzaktaki üçüncü vadiye düşüyordu. İki renk arasında hiçbir zaman tam olarak bir sınır oluşmuyordu.[6] Daha da yakından incelendiğinde, yeşil bir leke ile mavi vadi ara-

sındaki çizgide kırmızı serpintiler olduğu görülüyordu. Bu böylece devam ediyordu; sonunda Hubbard bu sınırlara bakıp çok farklı bir özelliği teşhis etti: Mandelbrot'un canavar görünümlü fraktallarına aşina olan kimseleri bile hayrete düşürecek bu özelliğe göre, hiçbir nokta sadece iki renk arasında sınır vazifesi görmemektedir. İki rengin bir araya gelmeye çalıştığı yerlerde, üçüncüsü daima araya girmekte ve araya sıkışan birtakım yeni, boyutsuz kümeler oluşturmaktadır. İmkânsız görülmekle birlikte her sınır noktasının, üç renkten her birinin bir bölgesiyle sınırı vardır.

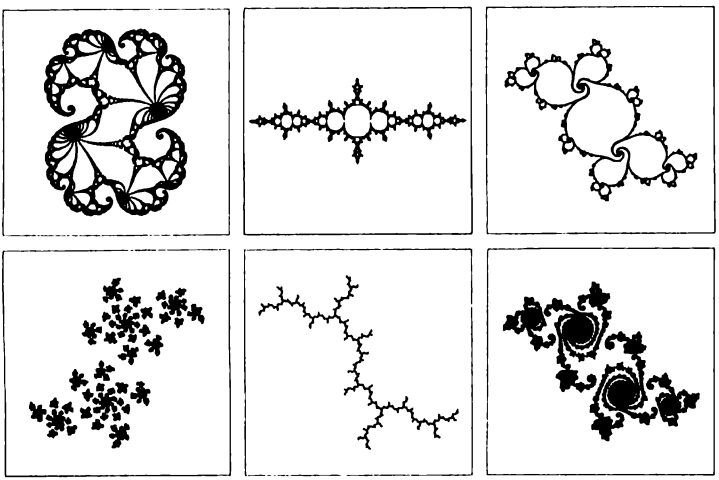
Hubbard bu komplike şekilleri incelemeye ve bunların matematikçiler bakımından etkilerini araştırmaya girişti. Hem kendi calışması hem de meslektaşlarının çalışmaları dinamik sistemler problemiyle ilgili olarak kısa zamanda yeni bir yaklaşımın temellerini oluşturdu. Newton yöntemine ilişkin fonksiyonların bir resimden ibaret olduğunu ve bunun, gerçek dünyadaki kuvvetlerin davranışlarını yansıtan hiç araştırılmamış tüm bir resim kümesi içindeki resimlerden sadece biri olduğunu anladı. Michael Barnsley kümedeki diğer resimlerle ilgileniyordu. Hubbard'la Barnsley'in kısa zaman sonra öğrendikleri gibi, Benoit Mandelbrot bütün bu şekillerin ağababasını keşfetmişti.

Mandelbrot kümesi,[7] hayranlarının da zevkle söylediği gibi, matematikteki en karmaşık nesnedir.[8] Tamamını görmeye ebediyete kadar geçecek zaman yetmez; kirpi gibi dikenli diskleri, dışa doğru çevresinde kıvrım kıvrım dönen spiralleri ve filamentleri, sonsuz sayıda çeşitlenmiş olarak asılı duran ampule benzeyen molekülleri ile sanki Tanrı'nın kendi bağındaki üzüm salkımlarından farksızdır. Bilgisayar ekranında ayarlanabilen bir pencereden renkli olarak incelerseniz Mandelbrot kümesinin fraktallardan daha fraktal olduğunu görürsünüz; çünkü her ölçekteki komplikasyonu çok zengin ve çeşitlidir. İçindeki değişik resimlerin kataloglanması ya da kümenin anahatları itibariyle sayısal bir betimlemesinin yapılması için sonsuz enformasyona gerek vardır. Ancak bu noktada bir çelişki ile karşılaşıyoruz: Kümenin tam bir betimlemesini bir iletişim hattı üzerinden göndermek için sade-

ce birkaç düzine kodlu karakter yeterli olur. Kısa ve özlü bir bilgisayar programında bütün kümeyi yeniden üretmeye yetecek kadar enformasyon mevcuttur. Kümenin karmaşıklıkla sadeliği birbirine nasıl mezcettiğini ilk anlamak durumunda olan kimseler - hatta Mandelbrot bile - hazırlıksız yakalanmışlardır. Mandelbrot kümesi adeta herkesin gözünde kaosun bir nevi sembolü haline gelmiş; desen olarak konferans broşürlerinin ve mühendislik dergilerinin pırıl pırıl kapaklarını süslemiş, 1985 ve 1986 yıllarında çeşitli ülkelere götürülen uluslararası bir bilgisayar destekli sanat sergisinin göz bebeği olmuştur. Bu resimlere bakıp Mandelbrot kümesinin güzelliğini algılamak kolaydı, ama matematikçiler bakımından anlamını kavramak o kadar kolay olmadı; nihayet onlar da yavaş yavaş anlamaya başladılar.

Fraktal şekillerin birçoğunu kompleks düzlemde tekrarlı prosesler gerçekleştirmek suretiyle meydana getirmek mümkündür; ancak, sadece tek bir Mandelbrot kümesi vardır. Bu da, Mandelbrot, Julia kümesi adıyla bilinen bir grup şekli genelleştirmenin bir çaresini bulmaya çalışırken, belli belirsiz, hayaletimsi bir şekilde görünmeye başlamıştır. Julia kümesi Birinci Dünya Savaşı sırasında Gaston Julia ve Pierre Fatou adlı Fransız matematikçileri tarafından icat edilmiş ve incelenmişti; kaldı ki, bu matematikçiler henüz bilgisayarlarca sağlanan resimlerle çalışmak imkânından yoksundu. Mandelbrot daha yirmi yaşında iken, bunların mütevazi çizimlerini görmüş ve - henüz çapraşık olan - yazılarını da okumuştu. Julia kümeleri, görünüşlerindeki çeşitliliğin arkasında, tam Barnsley'in aklını karıştıran muamma dolu nesnelerdi. Julia kümelerinden bazıları, sanki fraktal bir yapı vermek üzere, bazı yerlerinden çimdiklenerek deforme edilmiş çemberlere benzer. Diğer bazıları birbirinden ayrı bölgelerden oluşmuş, bir kısmı da birbirinden ayrı düşmüş tozlar görünümündedir. Öklityen geometrinin ne kelimelerini ne de kavramlarını kullanarak Julia kümelerini betimlemenin imkânı yoktur. Fransız matematikçisi Adrien Douady şöyle der: "İnanılmaz çeşitlilikte Julia kümeleri elde edersiniz: Bazıları tombul bulutlara benzer, bir kısmı cılız

böğürtlen çalıları gibidir, bazıları havai fişek yüksekte patladıktan sonra havaya dağılan kıvılcımları andırır. Kimisi bir tavşan şeklindedir, birçoğunun da deniz atınınki gibi kuyruğu vardır."[9]



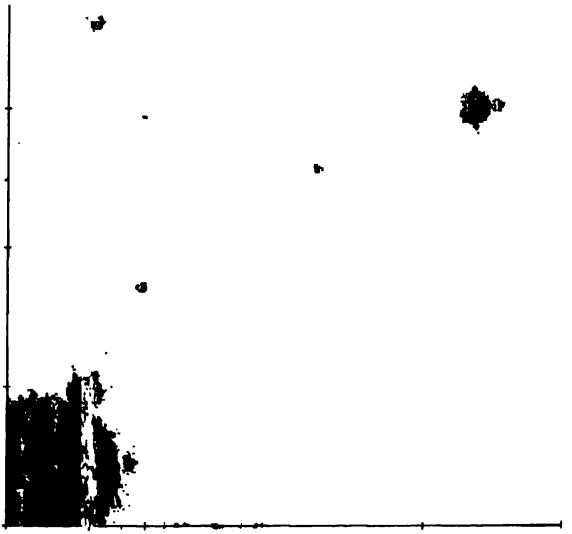
JULİA KÜMELERİNDEN BİR GÖRÜNÜŞ

Mandelbrot 1979'da, kompleks düzlemde yaratacağı bir görüntünün Julia kümeleri için bir katalog teşkil edeceğini, her biri için bir kılavuz vazifesi göreceğini keşfetti.[10] O sırada, iterasyon işleminin komplike proseslerdeki, kare köklü, sinüslü ve kosinüslü denklemlerdeki etkilerini araştırıyordu. Mandelbrot, düşünce sistemini tamamen sadeliğin karmaşıklık ürettiği önermesi üzerine bina ettikten sonra bile, IBM firmasındaki ve Harvard Üniversitesindeki bilgisayar ekranlarının hemen gerisinde, kendi görüş açısının dışında gezinip duran bu nesnenin ne kadar olağandışı olduğunu hemen anlayamadı. Programcılarını daha fazla ayrıntı bulup çıkarmaları için sıkıştırdı; programcılar, bütün gücünü zaten kullanmış oldukları bir bellekte biraz daha boş yer bulabilmek ve IBM marka bir mainframe bilgisayarda, ilkel bir renksiz ekran tüpüyle, noktalara yeni bir enterpolasyon tasarlamak için canlarını dişlerine takmışlardı. Üstelik, zavallı programcılar bir yan-

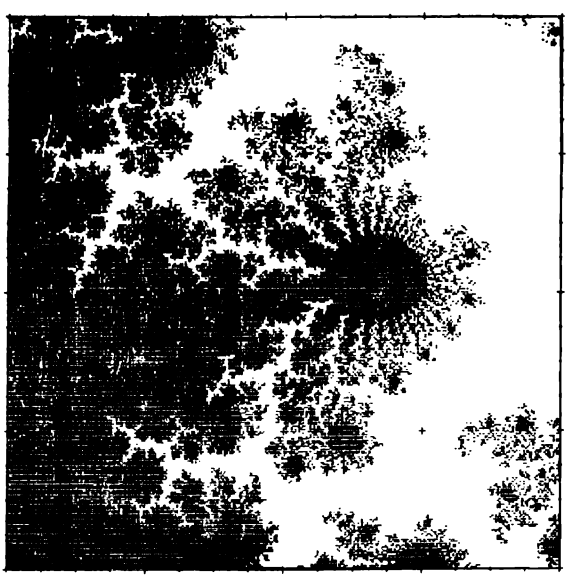
dan da bilgisayarla yapılan araştırmaların hepsinde ortaya çıkan bir tuzağa düşmemek için devamlı olarak ikazda bulunmak mecburiyetini hissediyorlardı; bu tuzak "yapay oluşumlar"dı, yani sadece makinenin çalışırken yaptığı küçük bir hatadan dolayı meydana çıkıveren ve program başka bir tarzda yazıldığında kaybolan birtakım özelliklerdi.

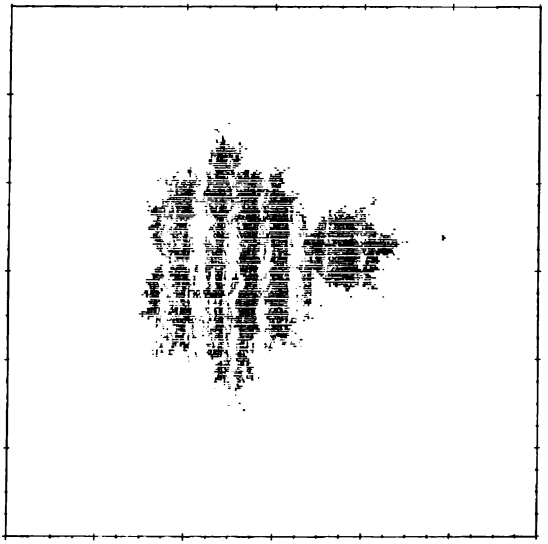
Mandelbrot, bundan sonra bütün dikkatini özellikle kolayca programlanan basit bir fonksiyon üzerinde topladı. Feedback sarmalını birkaç kez tekrarlayan bir programı çalıştırınca, ilk diskler kaba bir ızgara üzerinde anahatlarıyla belirdi. Kalem kâğıtla yapılan birkaç satırlık bir hesap bu disklerin matematiksel olarak gerçek olduğunu, bilgisayarın çalışmasındaki herhangi bir bozulma ya da hatadan meydana gelmediğini gösterdi. Ana disklerin sağ ve sol taraflarında, daha çok şekiller bulunduğunu gösteren işaretler belirdi. Mandelbrot sonraları, zihninde bunlardan daha da fazlasını gördüğünü söylemiştir: Bir şekiller hiyerarşisi içinde, atomlar sonsuza kadar birbirinden daha küçük atomlar üretiyordu. Kümenin gerçek doğruyla kesiştiği yerde birbirinin ardı sıra küçülen diskler geometrik bir düzenlilikle kademelenerek, dinamikçilerin şimdilerde "ardışık Feigenbaum dallanma dizileri" olarak teşhis ettikleri dizileri oluşturuyordu.

Bu buluşu Mandelbrot'u hesaplarını daha da derinleştirmeye teşvik etti; bu ilk ham görüntüleri daha ayrıntılı hale getirmesi üzerine disklere takılıp kenarlarında biriken ve disklerin yanı sıra uzayda yüzen tozları da hemen keşfetti. Daha da küçük ayrıntıları hesaplama gayretine girince[11] o ana kadar yanından ayrılmayan şans meleğinin birdenbire ortadan kaybolduğunu hissetti. Ayrıntılar arttıkça resimlerin hatları daha keskinleşeceğine daha çetrefilli hale geliyordu. IBM'in Westchester County'deki araştırma merkezine koşup Harvard Üniversitesinin bilgisayarlarında bulunmayan ölçekteki bilgiyar gücünden deneyinde yararlanmaya çalıştı. Çetrefilliğin artması gerçekte bir şeylerin var olduğunun işareti olarak Mandelbrot'u iyice hayrete düşürdü. Yeni filizler ve sarmaşık burguları ağır ağır dönerek ana adadan uzaklaşıyordu. Mandelbrot görünüşü nispeten düzgün olan bir sınır



MANDELBROT KÜMESİNİN GÖRÜNMESİ. Benoit Mandelbrot'un ilk başta aldığı ilkel çıktılarda kaba bir yapı görünmüş; bilgisayarın hesaplamalarının kalitesi arttıkça bu yapı da gittikçe daha çok ayrıntılarla belirmiştir. Böceğe benzeyen, yüzen "moleküller" ayrı ayrı adalar mıydı? Yoksa bunlar, ana gövdeye gözle görülemeyecek kadar ipince filamentlerle bağlı mıydı? Bunu bilmek mümkün değildi.







çizgisinin deniz atı kuyruklarına benzeyen bir spiraller zinciri içerisinde çözülerek eridiğini gördü. Rasyonel olan bir şey gıdasını irrasyonel olan bir şeyden alıyordu.

Mandelbrot kümesi noktaların bir araya gelmesinden oluşmuştur. Kompleks düzlemdeki her nokta - yani her kompleks sayı - kümenin ya içinde ya da dışında yer alır. Kümeyi tanımlamanın bir yolu da her nokta için yapılacak bir test çerçevesinde, basit bir aritmetik iterasyon işlemini içerir. Bir noktayı test etmek için kompleks sayısını alın; bu sayının karesini bulun; buna ilk sayıyı ekleyin; çıkan sonucun karesini alın; ilk sayıyı ilave edin; sonucun karesini alın - ve bunu böylece tekrar tekrar yaparak devam edin. Ortaya çıkan toplam sonsuza kadar gidiyorsa o nokta Mandelbrot kümesine dahil değildir. Çıkan toplam sonlu bir sayı ise (tekrarlanan bir sarmalda takılıp kalabiliyor ya da kaotik bir tarzda dolanıp durabiliyorsa) o nokta Mandelbrot kümesine dahil demektir.

Bir prosesin bu şekilde sınırsızca tekrarlanması ve sonucun sonsuz olup olmadığının sorgulanması günlük yaşantımızdaki feedback proseslerini andırmaktadır. Bir konser salonuna bir mikrofon, amplifikatör ve hoparlörler yerleştirdiğinizi düşünün. Ses feedbackinde bir cayırtı olması ihtimali sizi ürkütür. Mikrofonun alabileceği kadar güçlü bir gürültü amplifiye olarak hoparlörlerden ses halinde çıkacak, bu ses tekrar mikrofonu besleyecek ve sesin gücü daha da artacak; böylece çark dönmeye devam edecektir. Öte yandan, mikrofonun alamayacağı kadar hafif bir gürültü hiçbir etki yapamadan yok olup gidecektir. Bu feedback prosesini sayılarla modellemek isterseniz başlangıç olarak bir sayı alın, sayıyı kendi kendisiyle çarpın, çıkan sonucu kendi kendisiyle çarpın ve bunu yapmaya devam edin. Büyük sayıların hızla sonsuza doğru ilerlediğini görürsünüz: 10, 100, 1.0000 . . . . Küçük sayılar ise sıfıra doğru götürür: $^1/_2$, $^1/_4$, $^1/_{16}$ . . . . Geometrik bir resim çizmek için bu denkleme yüklendiğinde sonsuza doğru kaçmayan bütün sayıları bir araya getirip bu kümenin

bir tanımlamasını yapın. Bir doğru üzerinde, sıfırdan yukarı olan noktaları ele alın. Noktalardan biri bir feedback cayırtısı meydana getiriyorsa bunu beyaza boyayın. Cayırtı meydana getirmiyorsa siyaha boyayın. Kısa bir süre sonra 0'dan 1'e siyah bir doğrudan ibaret bir şekil belirdiğini göreceksiniz.

Tek boyutlu bir süreçte böyle bir deney gerçekleştirmeye ihtiyaç yoktur. Birden büyük sayıların sonsuza götüreceğini, geri kalanların ise götürmeyeceğini tespit etmek gayet kolaydır. Ancak kompleks düzlemlerin iki boyutunda, denklemi bile bile, iterasyonlu bir işleme dayalı bir prosesle tanımlanan bir şekli ortaya çıkarmak genellikle yeterli olmaz. Mandelbrot kümesinin geometrideki çember, elips ve parabol gibi klasik şekillerden farkı, kestirme yollar kullanmaya uygun olmayışıdır. Belirli bir denklemle hangi şeklin gideceğini görebilmenin tek yolu deneme-yanılma yöntemidir; deneme-yanılma yöntemi de bu yeni alandaki araştırıcıları düşünce düzeyinde Öklit'ten ziyade Macellan'a daha yakın kılmaktadır.

Böylece, şekiller âlemini sayılar âlemiyle birleştirmek bir bakıma geçmişten kopmak anlamına gelmiştir. Yeni geometrilerin doğuşu, her zaman bir kimsenin temel kurallardan birinde bir değişiklik yapması üzerine başlamıştır. Bir geometrici, "*Farzedelim ki uzay düz değil de kavisli olsun*" dese, sonuçta Öklit geometrisinin acayip kavisli bir benzeri ortaya çıkar ki, bununla genel rölativite teorisinin tam olarak doğru çerçevesini elde etmiş olursunuz. Uzayın dört, ya da beş, hatta altı boyutlu olduğunu farzedin. *Boyutu* ifade eden sayının bir kesir olduğunu farzedin. Şekillerin bükülebildiğini, gerilip uzatılabildiğini, düğümlenebildiğini farzedin. Ya da, şimdi, şekilleri tanımlamak için, bir denklemi bir kez çözmek yerine, bir feedback sarmalında iterasyon işlemi yaptığınızı farzedin.

Julia, Fatou, Hubbard, Barnsley, Mandelbrot - bütün bu matematikçiler geometrik şekillerin yapılışına ilişkin kuralları değiştirmişlerdir. Lise düzeyinde geometri bilgisine sahip olan ya da iki koordinat kullanarak haritadaki bir noktayı bulmuş olan herkesin, Öklit ya da Descartes yöntemle-

riyle denklemleri eğriler haline dönüştürme hakkında bir fikri vardır. Klasik geometri bir denklemi alıp buna *uygun düşen* sayıların kümesini araştırır. Böylece, $x^2+y^2=1$ gibi bir denklemin çözümlerinden bir şekil meydana gelir; bu durumda bu şekil bir çemberdir. Başka basit denklemlerden başka başka resimler, elipsler, parabollar, koni kesitli hiperbollar, hatta faz uzayındaki diferansiyel denklemlerin oluşturduğu daha da karmaşık şekiller meydana gelir. Buna karşılık, bir geometrici bir denklemi çözmek yerine iterasyon işlemine başlarsa bu denklem bir betimleme olmaz, bir proses haline gelir, statik olmaz dinamik olur. Bu denklemin içine bir sayı dahil olunca, buradan yepyeni bir sayı çıkar; bu yeni sayı denkleme girer ve bu böylece devam ederek noktalar bir yerden başka yere zıplar durur. Bir noktanın adresi, denkleme uygun düştüğü zaman değil, belirli bir tür davranış biçimi ürettiği zaman belirlenir. Bu davranış biçimlerinden biri kararlı durum olabilir. Başka bir davranış biçimi, durumların periyodik tekrarı doğrultusundaki bir yakınsaklık olabilir. Bir başka davranış biçimi de sonsuza doğru gemi azıya almış bir yarış olabilir.

Bilgisayarlar kullanılmaya başlamadan önce, bu yeni türde şekil oluşturmanın sağladığı imkânları kavrayan Julia ile Fatou bile, bu buluştan bir bilim çıkarabilecek durumda değillerdi. Bilgisayarlar sayesinde, deneme-yanılma geometrisi imkân dahiline girdi. Hubbard, Newton yöntemini birbiri ardına her noktanın davranışını hesaplayarak araştırdı; Mandelbrot da kendi kümesini ilk başta aynı biçimde inceledi, düzlemdeki noktaları birbiri ardı sıra taramak için bir bilgisayar kullandı. Tabii ki, bütün noktaları kapsayamadı. Hem zaman hem de bilgisayar sınırlı olduğundan, bu tür hesaplamalarda noktalardan oluşan bir ızgara kullanılır. Bilgisayarla uzun uzadıya hesap yapmaktan fedakârlık edip ızgara ne kadar ince tutulursa resmin çizgileri de o kadar keskin olur. Mandelbrot kümesinde hesap gayet basitti, çünkü prosesin kendisi de çok basitti: $z \rightarrow z^2+c$ fonksiyonunun

kompleks düzlemindeki iterasyonuydu. Bir sayı alın, o sayıyı kendi kendisiyle çarpın ve çıkan sonuca ilk sayıyı ekleyin.

Hubbard, şekillerin araştırılmasında bilgisayar kullanmak gibi yeni bir tekniği kullanmaya alıştıkça, matematik tekniğinde de yeni bir buluş gerçekleştirerek kompleks analiz yöntemlerini tatbik etmeye başladı; kompleks analiz matematikte daha önce dinamik sistemlerde tatbik edilmemiş bir alandı. Hubbard artık hepsinin zamanının aynı anda geldiğini hissediyordu. Matematiğin içindeki farklı bilim dallarını yakınsayarak bir kavşakta birleşecek şekilde yol almaktaydı. Mandelbrot kümesini *görmenin* yeterli olmayacağının farkındaydı; bundan önce, bu kümeyi anlamak istiyordu, nitekim, sonunda anladığını da ifade etti.

Kümenin sınırı, Mandelbrot'un canavarları gibi, sadece fraktal olsaydı her resmin aşağı yukarı kendisinden bir önceki resme benzemesi gerekirdi. Değişik ölçeklerde kendi kendine benzerlik ilkesi uyarınca, elektronik misroskopun bir sonraki büyütme düzeyinde ne göstereceğini öngörmek de imkân dahiline girerdi. Buna karşılık, Mandelbrot kümesinin derinliklerine doğru yapılan her dalışta yepyeni sürprizlerle karşılaşıldı. O kadar ki, Mandelbrot çok sınırlı bir *fraktal* tanımı yaptığından kuşku duymaya başladı;[12] aslında fraktal kelimesinin bu yeni nesneye uygulanmasını istiyordu. Yeteri kadar büyütüldüğünde, Mandelbrot kümesinin kendi kendisinin kaba örneklerini içerdiği görülüyordu; bunlar ana gövdeden ayrı, birtakım yüzen böceklere benzeyen nesnelerdi; daha da büyütüldüğünde bu moleküllerden hiçbirinin bir diğerine uymadığı görüldü. Her seferinde ortaya yeni türden deniz atları, adeta sera ürünü birtakım yeni kıvırcık türleri çıkıyordu. Aslında, kümenin hiçbir bölümü, büyütme derecesi *ne olursa olsun*, kümenin başka bir bölümüne tıpı tıpına benzemez.

Buna rağmen, yüzen moleküllerin keşfedilmesi bir problemin hemen su yüzüne çıkmasına neden oldu. Mandelbrot kümesinin tamamı, bir kıta ile onun denizdeki uzantısı yarımadalar gibi birbiriyle bağlantılı mıydı? Yoksa ince ince adalarla çevrili bir ana gövde gibi bir tozdan mı ibaretti? Julia kü-

meleriyle yapılan deney bu konuda hiçbir fikir vermiyordu, çünkü Julia kümeleri de iki türde geliyor, birazı bütün bütün şekiller, birazı da toz olarak görünüyordu. Tozlar, fraktal olduğu için, öyle bir özelliği vardır ki, iki parça "birlikte" olamamaktadır[13] - çünkü boş bir uzay bölgesi her zerreyi diğer zerreden ayırmaktadır - halbuki hiçbir zerre de "tek başına" değildir, zira nerede tek bir zerre bulsanız, orada birbirine keyfi bir biçimde yakın düşmüş zerrelerden oluşan bir de grup bulursunuz. Mandelbrot, resimlerine baktığı sırada, bilgisayar destekli deneyin bu temel sorunu çözmekte başarısız kaldığının farkına vardı. Bütün dikkatini, ana gövdenin etrafında havada dolanıp duran zerrecikler üstüne teksif etti. Bunların bazısı kayboldu, bazıları da açık ve seçik yakın-kopyalar biçiminde gelişti. Bağımsız gibi görünüyorlardı. Ancak, bunları birbirine bağlayan bağlar belki de o kadar ince idi ki, bilgisayarın belirlediği noktalardan oluşan dantel görünüşlü yapıdan kaçıp kurtulmaya devam ediyorlardı.

Douady ve Hubbard, yüzen her molekülün gerçekte kendisini diğerlerine bağlı tutan telkâri işine benzer bir yapıya, ana kümenin üzerindeki minik çıkıntılardan çıkmış ipince bir ağa, Mandelbrot'un tabiriyle "şeytan polimeri"ne asılı vaziyette durduğunu kanıtlayan parlak bir yeni matematik mantığına başvurdular. Bu matematikçiler, nerede olursa olsun, ne kadar küçük olursa olsun, her segmanın bilgisayarlı mikroskopta büyütüldüğü zaman, yeni birtakım moleküllerin var olduğunu gösterdiğini, bu moleküllerin her birinin ana kümeye benzediğini, ancak tamamen aynı da olmadığını kanıtladılar. Her yeni molekül kendi spiralleri ve aleve benzeyen projeksiyonlarıyla sarmalanmış durumdaydı; bunlar da, muhakkak, daha küçük, hep birbirine benzeyen fakat asla birbirinin aynı olmayan moleküllerin var olduğunu gösteriyor ve böylece sonsuz çeşitliliği olan bir görevi yerine getirircesine, sanki bir küçültme mucizesini gerçekleştirirken, içindeki her yeni ayrıntı kendi başına, mutlaka diğerlerinden farklı ve bütünlüğü olan bir evreni oluşturuyordu.

Heinz-Otto Peitgen, "Her şey geometrisi gayet düzgün, bir doğru çizgisi yaklaşımına uygundu,"[14] dedi. Modern sanat-

tan bahsediyordu. "Mesela, renkler arasındaki ilişkiyi bulmaya çalışan Josef Albers'in eserleri, tamamen birbiri üstüne konmuş farklı renkte karelerden ibaretti. Bu tür eserler çok popülerdi. Şimdi bakarsanız bunların modasının geçtiğini görürsünüz. Artık kimse bunlardan hoşlanmıyor. Almanya'da Bauhaus tarzında muazzam apartman blokları inşa ettiler; şimdi insanlar bunlardan taşınıyor, artık kimse oralarda oturmaktan zevk almıyor. Bana öyle geliyor ki, toplumda, doğa anlayışımızın bazı yönlerine karşı duyulan antipatinin bugün şimdi, çok derin sebepleri var." Peitgen bir ziyaretçinin, Maldelbrot kümesinde, Julia kümelerinde ve diğer bazı karmaşık iterasyon proseslerinde, gayet cazip renklerle boyanmış bazı bölgelerin büyütülmüş resimlerini seçmesine yardımcı oluyordu. Kaliforniya'daki küçük bürosunda diapozitifler, büyük boy saydam resimler hatta Mandelbrot kümesi resminden yapılmış bir takvim bile mevcuttu. "İçimizdeki büyük coşku, doğada böylesine değişik bir açıdan bakışımızla yakından ilişkilidir. Doğal bir nesnenin gerçek yüzü nedir? Mesela, ağacı alalım - ağaçta önemli olan nedir? Doğru çizgi mi yoksa fraktal nesne mi?" Öte yandan, Cornell'de John Hubbard aldığı siparişleri yetiştirmeye çalışıyordu.[15] Matematik bölümüne Mandelbrot kümesi resimleri talep eden yüzlerce mektup yağıyordu; Hubbard nümuneler ve fiyat listeleri hazırlamak zorunluluğunu bile hissetmişti. Düzinelerle görüntü hesapları yapılmış ve bilgisayarlarında stoklanmış olarak duruyor, istendiği anda, teknik ayrıntıları hatırlayan doktora öğrencilerinin de yardımıyla gösterilmeye hazır vaziyette bekliyordu. Göze en fazla hitap eden resimleri ise en yüksek rezolüsyonla ve en canlı renklerle, Peitgen ve Peter H. Richter adlı iki Alman ile bunların Bremen Üniversitesindeki araştırma ekibi, yerel bir bankanın işin heyecanına kapılıp sağladığı destek sayesinde gerçekleştirerek gönderiyorlardı.

Peitgen ile Richter, biri matematikçi diğeri de fizikçi olarak Mandelbrot kümesi üzerinde uzmanlaşmışlardı. Mandelbrot kümesi bu bilim adamlarının zihninde muazzam ufuklar açmıştı: Buna modern bir sanat felsefesi, matema-

tikte deneyin oynadığı yeni rolün bir gerekçesi, karmaşık sistemleri geniş halk kütlelerine anlatmanın yeni bir yolu olarak bakıyorlardı. Parlak kâğıtlara basılmış kataloglar ve kitaplar yayınladılar; bilgisayarlarından çıkardıkları resimlerle bir sergi oluşturup bununla dünyayı dolaştılar. Richter karmaşık sistemlere fizikten gelmiş[16] ve bu arada önce kimya sonra biyokimya yollarından geçerek metabolik reaksiyonlara ilişkin salınımları incelemişti. Bağışıklık sistemi ve şekerin maya ile enerjiye dönüşümü gibi fenomenler hakkında yazdığı bir makale dizisinde, alışkanlık icabı statik olarak görülen proseslerin dinamiğine çoğu zaman salınımların hükmettiğini gösterdi; bunun nedeni de canlı sistemlerin gerçek zamanda incelemeye kolaylıkla açılmasının mümkün olmayışı idi. Richter penceresinin pervazına iyi yağlanmış bir çifte sarkaç sallandırdı; "evcil dinamik sistemim" dediği bu sarkacı, çalıştığı üniversitenin atölyesine sipariş ederek kendisi için özel olarak yaptırmıştı. Zaman zaman sarkacı kaotik bir biçimde ritmik olmayan şekilde dönecek şekilde kurmakta ve bu salınımları bilgisayarda da modelleyebilmekteydi. Başlangıç durumuna bağlılık o kadar hassastı ki bir buçuk kilometre ötedeki bir tek yağmur damlasının çekim gücü sarkacın hareketini elli ya da altmış devir içinde, iki dakika kadar karıştırıyordu. Richter'in bu çifte sarkacının faz uzayını gösteren çok renkli grafik resimleri, periyodiklik ve kaosun birbirine girift olan bölgelerini gösteriyordu; mesela, bir metaldeki ideal mıknatıslanma bölgelerini belirtmek ve keza Mandelbrot kümesini araştırmak için de Richter aynı grafik yöntemini kullanmıştır.

Richter'in meslektaşı olan Peitgen için, karmaşıklığı incelemek sayesinde, sadece problem çözmek yerine, bilimde yeni bazı gelenekler yaratmak bakımından iyi bir fırsat elde edilmiştir. Peitgen, "İçinde bulunduğumuz çağ gibi yepyeni bir dönemde, bugün düşünmeye başlasanız ve de iyi bir bilim adamı iseniz birkaç güne veya bir haftaya yahut bir aya kalmaz gayet ilginç çözümler bulup çıkarırsınız,"[17] diyordu. Bu konuya henüz yapısı oluşmuş bir konu gözüyle bakmıyordu.

"Yapısı oluşmuş bir konuda, neyin bilindiği, neyin bilinmediği, insanların daha önce neleri denediği ve nelerin hiçbir sonuca götürmediği bilinir. O alanda, problem olarak bilinen bir problem üzerinde çalışmak zorundasınız, yoksa kaybolur gidersiniz. Ancak, problem olarak bilinen bir problemin de zor olmak mecburiyeti vardır, aksi takdirde belki de şimdiye kadar çözülmüş olması gerekirdi."

Matematikçilerin genellikle deneylerinde bilgisayar kullanmakta gösterdikleri aciz hali Peitgen'de pek yoktu. Tabii ki, her sonuç neticede klasik ispat yöntemleriyle kesinleştirilmek zorundadır, yoksa bu matematik olmaz. Bir görüntüyü grafik ekranında görmek bu görüntünün teorem ve ispat dilinde mevcut olduğunu garanti etmez. Ne var ki, sırf bu görüntünün var olduğu ihtimali bile matematiğin evriminde değişiklik olmasına yetmiştir. Peitgen, bilgisayar destekli araştırmanın matematikçilere daha doğal bir yol izleme serbestliği sağladığına inanmıştır. Matematikçi, geçici olarak, bir anlığına kesin ispat gerekliliğini askıya alabilir. Tıpkı fizikçilerin yaptığı gibi, deneylerinin kendisini götürebildiği noktaya kadar gidebilir. Bilgisayarın gerek sayısal bir hesaplama gücüne sahip olması gerekse sezgiye görsel ipuçları sağlaması, gelecek için önemli imkânlar vaat etmesinin yanı sıra matematikçileri çıkmaz sokaklara dalmaktan da kurtarır. Bundan sonra, yeni yollar bulunup yeni nesneler izole edilince, matematikçi klasik ispat yöntemlerine dönebilir. Peitgen şöyle demiştir: "Matematik gücünü kesinliğinden alır. Matematikçiler, geçerliliği mutlak olarak garantili olan bir düşünce çizgisini izleyebilme becerisini asla ellerinden bırakmak istemezler. Şimdi bakmakta olduğunuz durumlar ancak *kısmen* anlaşılabiliyor olabilir; belki de gelecek nesiller bunları kesinlikle anlayacaktır. Kesinliğe, evet diyorum, fakat sırf *şimdi* yapamıyorum diye bir şeyi terketmek pahasına da değil."[18]

1980'li yıllarda artık, kişisel bilgisayarlar Mandelbrot kümesinin renkli resimlerini çıkarabilecek kadar aritmetik işlemi dakik bir şekilde yapabiliyordu; amatör bilgisayarcılar da bu resimleri gittikçe daha büyüterek araştırmakla, büyü-

yen bir ölçekle oynamanın keyfine varılabileceğini çabucak buldular. Mandelbrot kümesini gezegen büyüklüğünde bir nesne olarak düşünseniz bir bilgisayar bu nesnenin tamamını ya da şehirler boyutundaki, binalar boyutundaki, odalar boyutundaki, kitaplar boyutundaki, harfler boyutundaki, bakteriler boyutundaki ya da atomlar boyutundaki özelliklerini gösterebilecekti. bu tür resimlere bakan kimseler bütün ölçeklerde birbirine benzer paternler bulunduğunu, fakat gene de her ölçeğin birbirinden farklı olduğunu gördüler. Bütün bu mikroskopik manzaraları üreten de bilgisayarın kodladığı aynı birkaç satırdan ibaretti.*

*Mandelbrot kümesi için yazılmış bir program için belli başlı birkaç unsura ihtiyaç vardır. Ana mekanizma kompleks sayısını başlangıç olarak alan ve ona aritmatik kuralı uygulayan bir komutlar sarmalıdır. Mandelbrot kümesi için kural şudur: $z \rightarrow z^2+c$. Burada z sıfırdan başlar, c de test edilen noktaya tekabül eden kompleks sayıdır. O halde, *0'ı alın, kendi kendisiyle çarpın ve ilk sayıyı ilave edin; sonucu alın - başlangıç sayısı - kendi kendisiyle çarpın ve başlangıç sayısını ilave edin; yeni sonucu alın, kendi kendisiyle çarpın ve başlangıç sayısını ilave edin.* Kompleks sayılarla yapılan aritmetik işlemleri düpedüzdür. Kompleks bir sayı iki kısım olarak yazılır: mesela $2 + 3i$ (noktanın kompleks düzlemdeki adresi 2 doğu ve 3 kuzeydir). İki kompleks sayıyı toplamak için, sadece gerçek kısımları toplayarak yeni bir gerçek kısım ve hayali kısımları toplayarak yeni bir hayali kısım elde edersiniz:

$$\begin{array}{r} 2 + 4i \\ +\ 9 - 2i \\ \hline 11 + 2i \end{array}$$

İki kompleks sayıyı birbiriyle çarpmak için bir sayının her kısmını diğer sayının her kısmıyla çarpar ve dört sonucu birbiriyle toplarsanız. i'yi kendi kendisiyle çarptığınızda, 1 çıkacağı için, hayali sayıların orijinal tanımına göre, sonucun bir terimi diğerinin içinde eriyecektir.

$$\begin{array}{r} 2 + 3i \\ \underline{x2 + 3i} \\ 6i + 9i^2 \\ \underline{+4 + 6i} \\ 4 + 12i + 9i^2 \end{array}$$
$$= 4 + 12i - 9$$
$$= -5 + 12i$$

Bu sarmalaşmadan kurtulmak için, programın iterasyonlar sonucunda çıkan toplamı gözetmesi gereklidir. Toplam, düzlemin merkezinden gittikçe uzaklaşarak

Mandelbrot kümesinin sınırı, kümeyi çizen bir programın en fazla vakit geçirdiği ve bütün kompromilerini yaptığı yerde bulunur. Orada, 100 veya 1.000 ya da 10.000 iterasyon işleminden sonra bile, program hâlâ bir noktanın kümenin içine düşüp düşmediğinden kesinlikle emin olamaz. Milyonuncu iterasyonun ne getireceğini kim bilebilir? Bu yüzden, kümenin en çarpıcı, en ince ayrıntılarıyla büyütülmüş resimlerini çıkaran programlar, ağır mainframe bilgisayarlarda ya da ayrı ayrı binlerce beyine zincirleme olarak aynı aritmetik işlemleri yaptıran paralel işlemcilere tahsis edilmiş bilgisayarlarda çalıştırılmıştır. Kümenin sınırı, kümenin çekiminden kaçmakta en yavaş kalan noktaların bulunduğu yerdedir. Sanki bu noktalar birbiriyle rekabet halindeki çekiciler arasında dengede durmaktadır; bu çekicilerden birisi sıfır noktasındadır, diğeri ise, gerçekte, sonsuzdaki bir yerlerde durup oradan kümeyi çağırmaktadır.

Bilim adamları Mandelbrot kümesinden yola çıkıp gerçek fiziksel fenomenleri temsil eden yeni problemlere geçince, kümenin sınırının nitelikleri ön plâna çıktı. Dinamik bir sistemdeki iki veya daha çok çekici arasındaki sınır, birçok normal prosese hükmeder görünen bir cins eşik görevini görüyordu; bu prosesler malzemenin kırılmasından kararların oluşturulmasına kadar uzanan bir yelpazeyi içermekteydi. Böyle bir sistemin içindeki her çekicinin kendi havzası var-

sonsuza doğru yol alıyorsa başlangıç noktası kümeye dahil değildir; tekrarlamalar sonucunda çıkan sonuç gerçek ya da hayalî kısmı itibariyle, 2'den daha büyük ya da -2'den daha küçük ise mutlaka sonsuza doğru yol almaktadır - program başka bir başlangıç noktasına geçebilir. Fakat program 2'den büyük olmaksızın hesaplamayı birçok kez tekrarlıyorsa nokta kümeye dahildir. Bu hesaplamanın kaç kere olacağını büyütmenin miktarı belirler. Kişisel bilgisayarların gücü çerçevesinde kalan ölçeklerde çoğunlukla 100 ya da 200 yeterli, 1000 de güvenli sınırlar içindedir. Program ızgara üstündeki binlerce noktanın her biri için bu süreci tekrarlamak zzorundadır; bunu yaparken kalan noktalar siyaha boyanabilir, diğer noktalar beyazdır. Ya da çok daha canı ve çekici bir resim elde etmek için, beyaz noktaların yerine renk tonları konabilir. Diyelim ki, on tekrardan sonra tekrarlama işleni kesiliyorsa program kırmızı bir benek belirlemiş olabilir; yirmi tekrar için turuncu bir benek; kırk tekrar için sarı bir benek ve böylece devam edilir. Renklerin ve tekrarlama işlemlerinin hangi sayıda durdurulacağının seçimi programcının takdirine bağlı olarak ayarlanabilir. Renkler kümenin dışında kalan alanın dış sınırlarını belirler.

dır; bu, tıpkı bir nehrin havzasındaki suların o nehire akmasına benzer. Her havzanın bir sınırı vardır. 1980'li yılların başlarında, itibarlı bir grup için matematik ve fizikte en fazla gelecek vaat eden yepyeni bir alan, fraktal havza sınırlarının incelenmesi idi.

Dinamiğin bu dalının asıl sorunu, bir sistemin nihai, istikrarlı davranışını betimlemek değil, birbiriyle çelişkili tercihler arasından sistemin nasıl bir seçim yaptığını araştırmak idi. Lorenz'in şimdi artık klasikler sınıfına girmiş olan modeli gibi bir sistemin içinde sadece tek bir çekici vardır; sistem istikrarlı hale geçince hâkim olan tek bir davranış biçimi mevcuttur, bu da kaotik bir çekicidir. Başka sistemler sonuçta, kaotik olmayan kararlı durumdaki davranış biçimlerini benimseyebilir - ancak muhtemel kararlı durumların sayısı birden fazladır. Fraktal havza sınırlarının[19] incelenmesi, kaotik olmayan birçok nihai durumdan birine erişebilecek olan sistemlerin incelenmesi demekti; burada sorun, bu nihai durumlardan *hangisi* olduğunun nasıl öngörüleceği idi. Kaosa adını taktıktan on yıl sonra fraktal havza sınırlarının araştırılmasında başı çeken James Yorke hayali bir tilt makinesi[20] önerdi. Tilt makinelerinin birçoğu gibi bu makinenin de yayla çalışan bir pistonu vardır. Pistonu geri çekip bıraktığınızda topu yukarı atıp oyunun oynandığı alana gönderir. Makinenin normalde eğimli bir düzlem üzerine yerleştirilmiş lastik kenarlı bantları ve elektrikli zıplatıcıları topu fazladan bir enerjiyle teperler. Bu tekme önemlidir: Enerjinin düzgün bir şekilde aşınıp azalmadığını gösterir. Örneği daha da sadeleştirmek için, makinenin alt tarafına fliperler konmamıştır, sadece iki çıkış kanalı vardır. Top oyun alanından dışarı çıkmak için bu iki kanalın ya birinden ya da ötekisinden geçecektir.

Tilt makinesinin determinist olduğu da kabul edilmiştir - makineyi sallamak bahis konusu değildir. Topun istikametini sadece tek bir parametre kontrol etmektedir, bu da pistonun başlangıçtaki pozisyonudur. Makinenin öyle bir biçimde tasarlandığını tahayyül edin ki, pistonu biraz çektiğiniz takdirde top neticede hep sağ taraftaki kanala yuvarlanacak,

buna karşılık pistonu çok çektiğiniz takdirde top daima sol taraftaki kanala düşecektir. Bu arada, top normalde enerji dolu, gürültülü ve değişken zaman aralıklarıyla bir tamponda öbürüne sıçradıktan sonra çıkış kanallarından birini ya da diğerini seçerken davranış karmaşık hale gelmektedir.

Şimdi de, pistonun mümkün olan her başlangıç pozisyonunu sonuç olarak bir grafikle gösterelim. Grafik sadece bir doğrudan ibarettir. Tamponun pozisyonlarından birisi, topu sağ taraftaki kanaldan çıkmaya yönlendiriyorsa kırmızı bir nokta işaretleyin, sol taraf için de yeşil bir nokta işaretleyin. Başlangıç pozisyonunun bir fonksiyonu olarak bu çekiciler hakkında neler bulacağımızı düşünebiliriz?

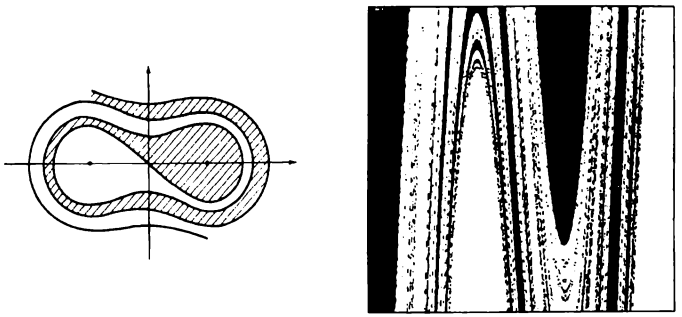
Sınırın fraktal bir küme olduğu görülmektedir; mutlaka kendi kendine benzer olması gerekmez, ancak sonsuz derecede ayrıntılıdır. Doğrunun bazı bölgeleri katışıksız kırmızı ya da yeşil olacak; diğerleri ise büyütüldüğünde, bunların yeşil içine kırmızı ya da kırmızı içine yeşil karışmış yeni bazı bölgeler içerdiği görülecektir. Yani denebilir ki, pistonun bazı pozisyonlarında küçük bir değişikliğin hiçbir farkı olmaz. Ancak, başka pozisyonlarda, keyfice yapılmış küçük bir değişiklik bile kırmızı ile yeşil arasındaki farkı ortaya çıkarmaktadır.

İkinci bir boyutun ilave edilmesi, ikinci bir parametre, ikinci dereceden bir serbestlik eklenmesi demektir. Mesela tilt makinesinde, oyun alanının eğimini değiştirmenin etkisi de incelenebilir. Bu halde öylesine aşırı bir tür karmaşıklıkla karşılaşılır ki, bu gibi durumlar, birden fazla parametresi olan hassas, enerji dolu gerçek sistemlerin istikrarını kontrol etmekle görevli olan mühendislere kâbus basmasına neden olur - bu sistemlerin iki örneği, 1980'li yıllarda kaostan esinlenmiş araştırmalara konu teşkil eden elektrik şebekeleri ile nükleer enerji santrallarıdır. A parametresinin bir değeri için, B parametresi güven sağlayıcı, düzenli bir davranış biçimi üretebilir; bunun içinde tutarlı istikrar bölgeleri de vardır. Mühendislerin ancak, lineer doğrultuda yaptıkları öğrenim dolayısıyla kazandıkları bilgilere uygun incelemeleri ve grafikleri gerçekleştirmeleri mümkündür. Halbuki, A

parametresinin başka bir değeri o civarda gizlenerek B parametresinin öneminde değişiklik meydana getirebilir.

Yorke, katıldığı konferanslarda kalkıp fraktal havza sınırlarının resimlerini gösteriyordu. Resimlerden bazılarında zorla salındırılan sarkaçların davranışı görülüyor ve bu sarkaçların sonuçta bir ya da iki nihai durumda karar kıldığı gösteriliyordu - dinleyicilerinin de gayet iyi bildiği gibi, zorla salındırılan sarkaç, günlük hayatımızda çeşitli şekillerde karşılaştığımız temel bir salınıcıdır. Yorke kıvançla, "Kimse benim, sarkaç seçerek sisteme hile karıştırdığımı söyleyemez. Doğaya baktığınız zaman her tarafta buna benzer şeyler görürsünüz. Ne var ki, bunun davranışı okuduğunuz şeylerden farklıdır. Bu fraktalın bir tür yabani davranış biçimidir."[21] Gösterdiği resimlerde gerçekdışı gibi duran siyah beyaz girdaplar vardı; sanki, mutfakta vanilyalı ve çikolatalı kek yapılırken çanağın içindeki hamuru birkaç kez çırptıktan sonra tamamen karıştırmadan bırakılmış gibiydi. Bu tür resimleri yapmak için bilgisayarının 1.000'e 1.000'lik bir ızgara üzerindeki noktalar arasında gidip gelmesi gerekiyordu; bu noktalardan her biri sarkacın değişik bir başlangıç pozisyonunu gösteriyordu; sonuç olarak da bütün noktalar işaretlenmiş ve ortaya siyah beyaz bir resim çıkmıştı. Bunlar çekim havzalarıydı; herkesin iyi bildiği Newtoncu hareket denklemleri tarafından karıştırılarak katlanmıştı; bundan çıkan sonuca bakılırsa, sınıra bundan daha çok benzeyen bir sınır bulmak mümkün değildi. Adreslenen noktaların dörtte üçünden fazlası bu sınırın üzerinde yer alıyordu.[22]

Araştırıcılara ve mühendislere göre, bu resimlerden çıkarılacak bir ders vardı; bir ders, bir de uyarı. Çoğu kez, karmaşık sistemlerin muhtemel davranış biçimlerini küçük bir veri kümesine bakarak tahmin etmek gerekiyordu. Sistem normal çalıştığı zaman, parametreler dar bir alan içinde kaldığı için, mühendisler gözlemlerini yapmakta ve bu kadar alışılmış olmayan davranışları, ekstrapolasyon yöntemiyle, az çok lineer bir şekilde çıkarabilmeyi umut ediyorlardı. Fraktal havza sınırlarını inceleyen bilim adamları ise sükunet ile felaket[23] arasındaki sınırın hiçbir kimsenin ha-



FRAKTAL HAVZA SINIRLARI. Dinamik bir sistemin uzun süreli davranışının kaotik olmadığı zamanlarda bile, belirli bir istikrarlı davranış ile bir başka davranışın arasındaki sınırda kaosun ortaya çıkması mümkündür. Çoğu zaman, dinamik bir sistemin birden çok denge durumu vardır, bunu bir sarkacın, kaidesine yerleştirilmiş iki mıknatıstan birinde duruşa geçmesine benzetebiliriz. Her denge bir çekicidir, iki çekici arasındaki sınır da komplike, fakat düzgün olabilir (soldaki resim). Ya da sınır komplike olabilir, fakat düzgün olmaz. Beyaz ve siyahın çok fraktal bir biçimde serpilmiş olması (sağdaki resim) sarkacın bir faz uzayı grafiğidir. Bu sistem mümkün olan iki kararlı durumdan birine muhakkak erişecektir. Bazı başlangıç şartları bakımından, bu çıktı epeyi öngörülebilir niteliktedir - siyah siyahtır, beyaz da beyazdır. Ancak, sınırlara yakın bölgelerde öngörüde bulunmak imkânsız hale gelmektedir.

yal dahi edemeyeceği kadar karmaşık olduğunu gösterdiler. Yorke, "Doğu Yakasının elektrik ikmal şebekesi tümüyle bir salınım sisteminden ibarettir; çoğu kez istikrarlıdır, ama insan, pertürbasyon yarattığı takdirde neler olacağını da doğrusu bilmek ister" diyordu. "Sınırın nerede olduğunu bilmeniz gerekir. Sorun, sınırın neye benzediği hakkında hiçbir fikirleri olmayışından kaynaklanmaktadır."

Fraktal havza sınırları teorik fiziğin bazı derin konularında uygulama alanı bulmaktadır. Faz geçişleri eşikle ilgili konulardı; Peitgen ve Richter de faz geçişleri içinde en çok incelenmiş sorun türlerinden birini, malzemelerde mıknatıslanma ve mıknatıssızlanma konusunu ele aldılar. Peitgen ve Richter'in bu gibi sınırları gösteren resimlerinde, kendine özgü bir güzelliği olan ve gayet doğal bir manzara görünümü arzeden karmaşıklık, birbirine gittikçe daha fazla karışan yumrular ve yarıklardan oluşan karnıbahara benzer şekille-

ri halinde görülüyordu. Parametreleri değiştirip resmi daha büyüttükçe ayrıntılar daha belirginleşiyor ve resimdeki gelişigüzellik gittikçe daha fazla artıyor; sonra birdenbire, hiç beklenmedik bir biçimde, gayet çetrefilli bir bölgenin merkezinin derinliklerinden çıkarcasına, iyi tanıdığımız yassı bir şekil üzerindeki filizleriyle beliriveriyordu: Bu Mandelbrot kümesiydi; üstelik her burgusu, her atomu da yerli yerinde idi. Evrenselliğin bir tablosu daha ortaya çıkmıştı. Peitgen ve Richter "Galiba bizim de büyüye inanmamız gerekecek,"[24] diye yazdılar.

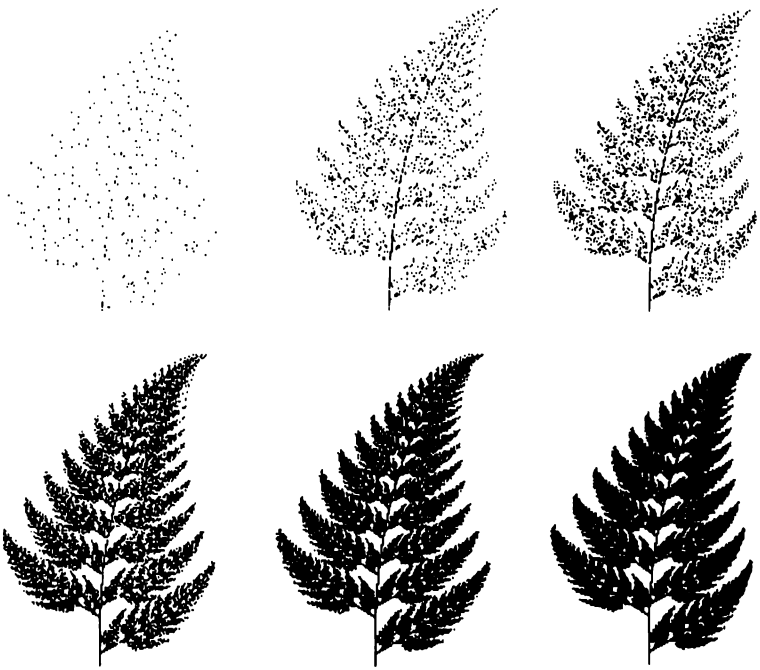
Michael Barnsley bambaşka bir yoldan gitti. Doğanın kendi görüntülerini düşünüp özellikle canlı organizmalardan kaynaklanan şekiller üzerinde durdu. Julia kümeleriyle deneyler yaptı, başka prosesleri de denedi; durmadan, çeşitliliği daha çok arttırmanın yollarını araştırdı. Nihayet, doğal şekilleri modellemede kullanılabilecek yeni bir yönteme temel teşkil etmek üzere gelişigüzellik üzerinde karar kıldı. Bulduğu bu yöntem hakkındaki yazısında,[25] yönteminden "iterasyonlu fonksiyon sistemleri vasıtasıyla fraktalların global inşası," adıyla söz etti. Yöntemi hakkındaki konuşmalarında ise, "kaos oyunu" ifadesini tercih ediyordu.

Kaos oyununu hızlı bir biçimde oynamak için, grafik ekranlı bir bilgisayar ile bir gelişigüzel sayı jeneratörüne ihtiyacınız olacaktır, ancak, aslında, bir sayfa kâğıt ile bir bozuk para da işinizi rahatça görebilir. Kâğıt üzerindeki bir yerde bir başlangıç noktası seçersiniz. Kâğıdın herhangi bir yerinde olabilir. İki kural icat edersiniz, bir yazı kuralı, bir de tura kuralı. Bu kurallar sizin bir noktadan başka bir noktaya nasıl gideceğinizi belirler: "Beş santimetre kuzeydoğuya git," ya da "Merkezin yüzde 25 kadar daha yakınına gel." Şimdi parayı havaya atmaya ve noktaları işaretlemeye başlarsınız; bunun için paranın yazı yüzü üstü geldiğinde yazı kuralını, tura yüzü üste geldiğinde tura kuralını uygularsınız. Blackjack oyununda kâğıt dağıtan krupye nasıl yeni bir el dağıtırken ilk birkaç kâğıdı destenin içine karıştırıyorsa, siz de ilk elli noktayı silip attığınız takdirde, kaos oyununun gelişigüzel bir benekler alanı üretmek yerine, oyun devam

ettikçe hatları daha da keskinleşerek beliren bir şekille karşılaşırsınız.

Barnsley'in bu konudaki temel yaklaşımı şu olmuştur: Julia kümeleri ve diğer fraktal şekiller determinist bir prosesin çıktıları gibi görünmekle birlikte bunların, gelişigüzel bir prosesin sınırı olarak da aynı derecede geçerli olan ikinci bir mevcudiyetleri vardır. Barnsley, bir benzetme yapmak gerekirse bir odanın zeminine tebeşirle çizilmiş bir İngiltere haritasının göz önüne getirilebileceğini söylemiştir. Kaldı ki, elinde klasik aletler bulunan bir sörveyciye göre, bu özensiz resimlerin alanını ölçmek, fraktal sahiller de göz önüne alındığında komplike bir iş gibi görünebilir. Oysa havaya birer birer pirinç taneleri attığınızı, bunların yere gelişigüzel bir biçimde düştüklerini ve haritanın içine isabet eden taneleri saydığınızı farzedin. Zaman ilerledikçe, aldığınız sonuç bu şekillerin alanına yaklaşmaya başlayacak, yani gelişigüzel bir prosesin sınırı haline gelecektir. Dinamiğin ifade biçimiyle, Barnsley'in şekillerinin birer çekici oldukları ortaya çıkmıştır.

Kaos oyunu belirli bazı resimlerin fraktal niteliğinden yararlanmıştır; bu nitelik ana resmin küçük küçük kopyalarından oluşmuş bulunmasıdır. Gelişigüzel olarak iterasyona uğrayacak bir dizi kuralın tanımlanması, bir şekle ilişkin belirli global enformasyonun ifadesi idi; kuralların iterasyonu işlemi de ölçeği hiç dikkate almaksızın enformasyonu geri tepiyordu. Bu anlamda, bir şeklin fraktallığı arttıkça bu duruma uyan kurallar daha basitleşiyordu. Barnsley şimdi artık klasikleşmiş olan Mandelbrot'un kitabındaki bütün fraktalları üretebileceğini derhal fark etti. Mandelbrot'un kullandığı tekniğin özelliği arka arkaya sonsuz olarak yaptığı inşalar ve iyileştirmelerden meydana gelmesiydi. Koch'un kar tanesi ya da Sierpinski'nin contasına gelince, doğru parçaları kaldırılıp bunların yerine belirli şekiller konur. Buna karşılık Barnsley, kaos oyunundan yararlanarak kaba taklitler olarak başlayan ve gittikçe daha keskin hatlarla gelişen resimler yapmıştır. Bunun için iyileştirme prosesine de gerek yoktu: Nihai şekli şu veya bu biçimde içeren tek bir kurallar dizisi yeterliydi.



KAOS OYUNU. Yeni noktaların her biri gelişigüzel düşmekte, buna rağmen tedricen bir eğrelti otu görüntüsü belirmektedir. Gerekli bütün enformasyon birkaç basit kuralda kodlanmış bulunmaktadır.

Barnsley ve iş arkadaşları bundan sonra resimleri üretirken tamamen kontrol dışına kaçan bir programı uygulamaya giriştiler; bu programdan lahanalar, küfler, çamurlar çıkıyordu. Burada asıl sorun, prosesin nasıl tersine döndürüleceğiydi: belirli bir şekil bahis konusu olduğunda hangi kural dizisi seçilecekti? Barnsley bu sorunun cevabına "kolaj teoremi" adını vermişti; bu çözüm o kadar basitti ki dinleyenler zaman zaman bu işin içinde bir hile olup olmadığında

tereddüte bile düşüyorlardı. Yeniden üretmeyi istediğiniz şeklin çizimiyle işe başlarsınız. (Eskiden beri eğrelti otlarına hayran olan Barnsley ilk yaptığı deneylerin birinde siyah bir eğrelti otu seçmişti.) Sonra, noktalama cihazı olarak bir bilgisayar terminali ile bir fare kullanarak orijinal şeklin üzerine bunun küçük kopyalarını yaymaya başlarsınız; bunlar gerektiğinde üst üste çakışırken kenarlarından taşabilir de. Şeklin fraktallığı arttıkça, kopyalarının kendi üstüne duvar gibi örülmesi daha kolay olur; şeklin fraktallığı az ise daha zor olur; belirli bir yaklaşıklık düzeyinde her şeklin üst üste dizilmesi mümkündür.

Barnsley, "Görüntü komplike ise kurallar da komplike olur,"[26] demiştir. "Diğer taraftan, nesne gizli bir fraktal düzen içeriyorsa - nitekim, doğanın büyük kısmında bu gizli düzenin bulunduğu Benoit'nın gözlemlerinin esasını teşkil etmiştir - birkaç kuralla bunun şifresini çözmek mümkün olacaktır. O takdirde, bu model Öklit geometrisi ile yapılmış bir modelden daha ilginç olacaktır, çünkü biz biliyoruz ki, bir yaprağın kenarına baktığınızda doğru hatlar görmezsiniz." Barnsley'in masasının üstündeki küçük bilgisayarının ilk çizdiği eğrelti otu, tıpı tıpına çocukluğundan beri sakladığı eğrelti otu kitabındaki resme benziyordu. "Bu resim insana küçük dilini yuttururdu, çünkü her haliyle kusursuzdu. Bunu teşhis edemeyecek bir biyolog düşünemiyordum."

Barnsley'in iddiasına göre, doğa bir bakıma, kaos oyununu kendi anlayışına göre oynamak gereğini duyuyordu. "Eğrelti otu sporunun içinde ancak bir eğrelti otunun kodlarını içermeye yetecek kadar enformasyon bulunmaktadır," dedi. "O halde, eğrelti otunun yetişmesi için gerekli olan özenin de bir sınırı vardır. Eğrelti otlarını betimleyecek kadar eşit değerli kısa enformasyonu bulabildiğimize şaşmamak gerekir. Başka türlü olsaydı şaşmak gerekirdi."

Gerçekten iş şansa mı kalmıştı? Hubbard da Mandelbrot kümesi ile enformasyonun biyolojik kodlaması arasındaki paralellik üzerinde durmuş olmasına karşın, birisi kalkıp bu gibi proseslerin olasılığa bağlı olduğunu ileri sürdüğünde tüyleri diken diken oluyordu. Hubbard, "Mandelbrot küme-

sinde gelişigüzelliğin yeri yoktur,"[27] diyordu. "Benim yaptığım hiçbir şeyde gelişigüzelliğin yeri yoktur. Gelişigüzelliğin biyolojiyle doğrudan bir ilişkisi olduğu ihtimaline de kesinlikle inanmıyorum. Biyolojide gelişigüzelliğin adı ölümdür, kaosun adı ölümdür. Biyolojide her şey en ileri düzeyde yapısallaşmıştır. Bitkileri klonladığınız zaman, dalların çıkış sırası bile tamamen aynıdır. Mandelbrot kümesi öyle dakik bir şemaya riayet eder ki, bunda hiçbir şey tesadüfe bırakılmamıştır. Şuraya yazıyorum; günün birinde birisi çıkıp da beynin nasıl organize olduğunu gerçekten keşfederse olağanüstü bir dakikliğe sahip olan beynin inşası için bir kodlama şeması mevcut olduğunu keşfedecekler ve bu yüzden de hayretler içinde kalacaklardır. Biyolojide gelişigüzellik fikri refleksten başka bir şey değildir."

Bununla birlikte, Barnsley'in yönteminde tesadüf sadece bir araç olarak kullanılmaktadır. Sonuçlar determinist ve öngörülebilir niteliktedir. Bilgisayar ekranında noktalar yanmaya başladığında, bir sonraki noktanın nerede belireceğini hiç kimsenin tahmin etmesi imkânı yoktur; bu tamamen makinenin kendi içinde attığı yazı turaya bağlıdır. Oysa bir şekilde, ışığın akışı fosforlu bir şekli tanımlamak için gerekli olan sınırların her zaman içinde kalmaktadır. Bu düzeyde tesadüfün rolü olsa olsa hayalden ibarettir. Barnsley, "Gelişigüzellik aldatmacadan başka bir şey değildir,"[28] demiştir. "Gelişigüzellik olmasa, fraktal nesneden beslenen belirli bir değişmez ölçünün görüntülerini elde edemezsiniz. Fakat nesnenin kendisi bizatihi gelişigüzelliğe bağımlı değildir. Olasılık bir ise hep aynı resmi çizersiniz.

"Fraktal nesneleri gelişigüzel bir algoritma ile sondalamak sayesinde çok ayrıntılı enformasyon elde ediyoruz. Bu tıpkı şuna benzer: yeni bir odaya girdiğimizde, gözlerimizi bu odanın içinde belirli bir sırayla gezdiririz, bu belki de gelişigüzel bir sıradır; böylece oda hakkında iyi bir fikir edinmiş oluruz. Oda ne ise odur. Nesne benim ne yaptığımdan tamamen bağımsız olarak mevcuttur."

Mandelbrot kümesi de, aynı şekilde mevcuttur. Mandelbrot kümesi, Peitgen ve Richter, onu bir sanat biçimi haline

dönüştürmeden önce de, Hubbard ve Douady onun matematik özünü anlamadan önce de, hatta Mandelbrot onu keşfetmeden önce de mevcuttu. Bilim kendine bir içerik yarattığı - yani kompleks sayılardan oluşan bir çerçeve ve iterasyonlu fonksiyonlar yaklaşımı yarattığı - andan beri mevcuttu. Ondan sonra oturup sırrının çözülmesini beklemiştir. Hatta belki daha önce de, doğa, sonsuz bir sabırla ve her yerde aynen tekrarladığı basit fizik yasalarını kullanarak organize olduğu andan beri mevcuttu.

Dinamik Sistemler Kulübü

Devrimin ayırım çizgisi üzerinden yapılan haberleşme ister istemez parçalı olacaktır.

THOMAS S. KUHN

San Fransisco'ya bir saat kadar mesafede, Kaliforniya Üniversitesinin en yeni kampüsü olarak kurulan Santa Cruz[1] masal kitaplarındaki manzara resimlerinden çıkmış gibi yerdi; hatta bazen Santa Cruz'u üniversiteden çok bir milli parka benzetenler de olmuştur. Binalar sanki dev sekoya* ağaçlarının arasında yuvalanmış gibi duruyordu; o zamanki anlayış uyarınca, projeleri çizen mimarlar inşaat yapılırken hiçbir ağacın kesilmemesine çok önem vermişlerdi. Bir binadan öbür binaya küçük patikalardan gidiliyordu. Kampüsün tamamı olduğu gibi bir tepenin üstüne yerleşmişti; öyle ki, zaman zaman Monterey körfezinin ışıltılı dalgalarını bile görmek mümkün olabiliyordu. Santa Cruz 1966'da hizmete açılmış ve birkaç yıl içinde Kaliforniya'daki üniversiteler arasında girilmesi en zor kampüs haline gelmiştir. Santa Cruz denince öğrencilerin aklına fikir akımlarının avangardını oluşturan sembol isimlerden birçoğu gelmiştir: Norman O. Brown, Gregory Bateson ve Herbert Marcuse orada ders vermiş, Tom Lehrer de orada şarkı söylemiştir. Sıfırdan kurulup meydana çıkan lisansüstü bölümleri, fizik bölümü de dahil, başlangıçta çelişkili yaklaşımların etkisinde kalmıştır. Öğretim üyesi olarak çoğunluğu genç on beş kadar fizikçinin bulunduğu fizik fakültesi, bu dinamik yapısıyla, eğilimleri ne olursa olsun Santa Cruz'un cazibesi-

*Kaliforniya'da yetişen 100-130 m boyunda büyük bir orman ağacı. (ç.n.)

ne kapılan başarılı konformist olmayan fizikçiler için çok uygun bir yuva teşkil ediyordu. Bu fizikçiler, bir yandan o zamanın serbest düşünceye gem vurmayan fikri yaklaşımının olumlu etkilerini hissederken, diğer yandan da bazı standartlar saptama ve ciddi olduklarını herkese gösterme gereğine inanarak gözlerini güneye, Caltech'e* çevirmişlerdi.

Bu fizikçilerin arasında Robert Stetson Shaw adlı bir doktora öğrencisi vardı; ciddiyetinden kimsenin en ufak bir tereddütü olmadığı Shaw bir doktor baba ve bir hemşire annenin altı çocuğundan en büyüğü olarak Boston'da doğmuş, Harvard'dan mezun olmuştu; 1977 yılında otuz bir yaşına girmek üzereydi. Bu yaşta çok fazla doktora öğrencisi olmadığından diğer birçoğuna göre daha yaşlı kalıyordu; Harvard'da okuduğu sırada bir yandan askerlik hizmetini yapması öte yandan küçük bir grupla birlikte yaşaması ve bu iki aşırı yaşam biçimi arasında başından, hiç akla gelmeyecek birtakım tecrübeler geçmesi dolayısıyla eğitimine birkaç kez ara vermek zorunda kalmış, bu yüzden de mezuniyeti biraz gecikmişti. Santa Cruz'a neden geldiğini bilmiyordu.[2] Bu kampüsü evvelce hiç görmemiş, sadece eline geçen bir broşürde sekoya ağaçları resimlerinin yanı sıra, Santa Cruz'da eğitimde yeni bir felsefe anlayışının hâkim olduğu yolunda bazı şeyler okumuştu. Shaw sakin, biraz da utangaç karakterinin zoruyla sessiz kalan bir kişiliğe sahipti. İyi bir öğrenciydi, süper iletkenlik konusundaki doktora tezini tamamlamasına birkaç ayı vardı. Bu yüzden de, hiç kimse, onun Fizik bölümü binasının bodrum katındaki analog bilgisayarla oynayıp durmasını vakit kaybı olarak düşünüp bundan bir rahatsızlık duymuyordu.

Fizikçilerin eğitimi usta-çırak ilişkisine dayanır. Profesörler laboratuvardaki çalışmaların ya da usanç verici hesaplamaların yapılması için lisansüstü öğrencilerini yanlarına yardımcı araştırıcı olarak alırlar. Buna karşılık doktora öğrencilerine ve doktora-üstü araştırma yapanlara da, profesörlerin araştırma için aldığı hibelerden ve yapılan yayınla-

*Kaliforniya Teknik Üniversitesinin kısa adı. (ç.n.)

rın şerefinden bir pay düşer. Ustanın iyisi öğrencilerine hem çözülmesi mümkün olan hem de işe yarayan problemleri seçmekte yol gösterenidir. İlişkinin olumlu gelişmesi halinde, profesör nüfuzunu kullanıp çırağının iş bulmasına da yardımcı olur. Çoğu kez, usta ile çırağının adlarının ebediyete kadar birlikte anıldığını duyarsınız. Ancak, bir bilim dalı henüz doğmamışsa bunu öğretecek kimse de yok demektir. 1977'de kaos alanının ustası henüz yoktu. Kaosun dersi de yoktu, nonlineer incelemeler ve karmaşı sistem araştırmaları için merkezler de yoktu, kaosun ders kitapları da yoktu, bir kaos dergisi bile yoktu.

Santa Cruz'daki öğretim üyelerinden kozmolog ve relativiteci William Burke,[3] genel relativite konusunda bir konferansa katılmak üzere Boston'da bulunduğu sırada, konferansın düzenlendiği otelin lobisinde, geceyarısından sonra saat birde, aynı konferansa katılan astrofizikçi arkadaşı Edward A. Spiegel ile karşılaştı. Spiegel, Burke'ye, "Biraz önce, Lorenz'in çekicisi hakkında bir konuşma dinledim," dedi. Spiegel, kaosun amblemi olan Lorenz çekicisini, bir hi-fi setine bağlı üstünkörü yapılmış bir devreyi kullanarak sarmallı bir pompalı mızıka antimelodisi haline getirmişti. Burke'yi barda bir içki içmeye davet edip yaptıklarını arkadaşına izah etti.

Spiegel Lorenz'i şahsen tanıyordu; 1960'lı yıllardan bu yana kaos hakkında da bir şeyler öğrenmişti. Yıldızların hareketlerine ilişkin modellerde rasgele davranış olasılıkları hakkındaki ipuçlarını araştırmayı kendine iş edinmiş ve bu konuda Fransız matematikçileriyle temaslar kurmuştu. Sonunda, Columbia Üniversitesi öğretim üyesi bir profesör olarak, uzaydaki türbülansı - "kozmik aritmiler"[4] - astronomi çalışmalarının odak noktası haline getirmişti. Ortaya attığı yeni fikirleriyle meslektaşlarını kendisine hayranlıkla bağlardı; nitekim, o gecenin ileri saatlerinde Burke'yi de etkilemişti. Burke bu gibi yeni fikirlere karşı açık bir insandı. Şöhretini, Einstein'ın fiziğe getirdiği en çelişkili kavramlardan biri olan gravitasyon dalgalarının uzay-zaman dokusu içerisinde oynaşmaları kavramı üzerinde çalıştığı sırada ka-

zanmıştı. Bu kavramın esası, akışkanlar dinamiğindeki belayı berzah birtakım nonlineerliklerle ilişkili bir davranış bozukluğundan kaynaklanan nonlineer bir probleme dayanıyordu. Aynı zamanda da, tamamen soyut ve teorik bir problemdi; ancak, Burke'nin gerçek uygulamalı fiziğe de düşkünlüğü vardı, hatta bir keresinde bira bardaklarının optiğine ilişkin bir makale bile yayınlamıştı: Bunda, bardağa hep tamamen birayla dolu görünümü vermek için, ne kadar kalın camdan yapılabileceği konusunu incelemişti. Fiziği gerçek hayatla bir tuttuğu için kendisinin biraz eski kafalı olduğunu söylemekten hoşlanırdı. Üstelik, Robert May'in öğretim programlarında basit nonlineer sistemlere daha fazla yer verilmesi yolundaki görüşünü izah ettiği *Nature* dergisindeki makalesini okumuş ve May'in denklemleriyle bir hesap makinesinde oynayarak birkaç saat geçirmişti. Bu yüzden Lorenz çekicisi Burke'ye çok ilginç geldi. Dinlemeye hiç niyeti yoktu. Görmeden olmayacaktı. Santa Cruz'a döndüğünde, üzerine üç diferansiyel denklemli bir kümeyi karaladığı bir kâğıt parçasını Rob Shaw'un eline tutuşturdu. Acaba Shaw bu denklemleri analog bilgisayara girebilir miydi?

Bilgisayarın evriminde analog makineler bir nevi çıkmaz sokak olmaktan ileri gidememiştir. Genellikle fizik bölümlerinde analog bilgisayar olmazdı; bu makinelerin Santa Cruz'da bulunması ise tamamen bir tesadüfün neticesiydi: Santa Cruz kampüsünün ilk projesinde[5] bir mühendislik fakültesi inşa edilmesi de öngörülmüştü; daha sonra mühendislik fakültesinden vazgeçilmiş fakat, gayretkeş bir satınalma memuru bu fakülte için gerekli olacağı düşünülen cihazların bir kısmını satın almıştı bile. Açık ve kapalı devrelerden, sıfır ya da bir, hayır ya da evet elemanlarından oluşan sayısal bilgisayarlar programcıların sordukları sorulara kesin karşılıklar bulabiliyor, bilgisayar devrimine hükmeden teknolojideki küçültme ve hızlandırma ihtiyacına da çok daha iyi yanıt verebiliyordu. Sayısal bilgisayarla bir kere yaptığınız bir şeyi tekrar yapabiliyor, tamamen aynı sonucu alabiliyor ve ilke olarak, aynı şeyi başka bir sayısal bilgisayarda da tekrarlayabiliyordunuz. Buna karşılık, analog bilgisa-

yarlar, tasarımları itibariyle çetrefilliydi. Bu bilgisayarların yapımında kullanılan elemanlar evet-hayır kontaklarıyla değil, rezistans ve kondansatörler gibi, transistörler çıkmadan önceki dönemlerde radyoculukla uğraşmış herkesin gayet iyi bildiği birtakım elektronik devrelerden oluşuyordu; Shaw da bu yollardan geçmiş bir kimseydi. Santa Cruz'daki makine Systron-Donner marka, her tarafı tozlu, hantal bir analog bilgisayardı; ön yüzünde, eski model telefon santrallarındaki fişlerin sokulup çıkarıldığı tablolara benzeyen fişli bir tablo vardı. Analog bilgisayarı programlamak için elektronik komponentleri seçmek ve kabloları fişli tabloya sokmak gerekiyordu.

Bilgisayardaki devreleri çeşitli kombinasyonlar halinde bir araya getiren programcı, diferansiyel denklem sistemlerini mühendislik sorunlarının çözümüne gayet uygun düşen bir tarzda simüle etmektedir.[6] Diyelim ki, en sarsıntısız şekilde yolculuk yapabilmek için otomobil süspansiyonunun tasarımını yapacaksınız ve bunun için de yaylarını, amortisörlerini ve aracın kütlesini hesaba katacaksınız. Devrenin içindeki salınımlar gerçek fiziksel sistemdeki salınımlara tekabül edecek şekilde yapılabilir. Yay yerine bir kondansatör koyarsınız, kütlenin yerini de bir indükleç alır, diğer şeyleri de böylece ikame edersiniz. Hesaplarınızı kesin yapamazsınız. Sayısal hesaplar bir kenara bırakılır. Bunun yerine, elinizde metal ve elektronlardan meydana gelmiş, gayet hızlı - en güzel tarafı da - kolaylıkla ayarlanabilen bir modeliniz olur. Sırf düğmeleri çevirerek değişkenleri ayarlayabilir, yayları daha sert ya da sürtünmeyi daha zayıf hale getirebilirsiniz. Bir osiloskop ekranında çizilen şekillere bakıp sonuçların da gerçek zamanda değiştiğini görürsünüz.

Shaw, bir yandan tez çalışmasını bitirmek için arada sırada üst kattaki süper iletken laboratuvarına da çıkıyordu. Fakat asıl vaktini Systron-Donner'le oynayarak geçirmeye başlamıştı. Bu arada, çalışmasında bazı basit sistemlerin faz uzayında ortaya koydukları tabloları - periyodik yörüngelerin ya da limit çevrimlerin çizgilerini - görebilecek düzeye ulaşmıştı. Bu arada belki kaosu garip çekiciler biçiminde

görmüştü, fakat tabii ki, kaosu tanıması mümkün değildi. Eline tutuşturulan kâğıdın üzerindeki Lorenz denklemleri uğraşıp durduğu sistemlerden daha komplike sayılmazdı. Doğru kabloları yerli yerine takıp düğmeleri ayarlamak sadece birkaç saatini aldı. Birkaç dakika sonra Shaw, süper iletkenler konulu tezini artık ömrü billâh bitiremeyeceğini anlamış bulunuyordu.[7]

Bölümün bodrumunda geçirdiği birçok gece boyunca, osiloskopun ekranı üzerinde uçarcasına dolaşan o yeşil noktanın arka arkaya durmadan Lorenz çekicisinin o karakteristik baykuş maskesini çizişini seyretti. Daha önce yaptığı hiçbir araştırmada görmediği bu çırpınan, çırpışan nesne, akış halindeki bir şekil olarak Shaw'un beynine yerleşti. Sanki bu nesnenin bir canı vardı. Tıpkı girdiği şekilleri bir daha hiç tekrarlamayan bir alev gibi, Shaw'un zihninde adeta hipnoz etkisi yapmıştı. Shaw'un bir şansı da, analog bilgisayarın kesin sonuçlar veremeyişi ve işlemleri aynen tekrarlayamayışıydı. Başlangıç durumunun şartlarına hassas bağımlılığı hemen gördü; kaldı ki, Edward Lorenz'i uzun süreli hava durumu tahmini yapmanın gereksizliği konusunda ikna eden şey de bu olmuştu. Makineyi başlangıç durumunun şartlarına göre ayarladı, çalıştırma düğmesine basıp çekiciyi harekete geçirdi. Sonra, aynı başlangıç durumu şartlarına göre tekrar - fiziksel olarak mümkün olabildiği ölçüde - ayarları yaptı; bu kez yörünge eskisinden değişik bir güzergâhta şen şatır sallanıp dolandı, fakat sonunda gene dönüp aynı çekiciye geldi.

Shaw çocukluğunda bilimin ne olduğunu kendince yorumlarken, bilinmeyeni keşfetmenin romantik bir yolu olduğunu düşünürdü. Aslında, bu da onun hayalinde canlandırdığı keşiflerden daha farklı bir şey değildi. Bakarsanız, düşük sıcaklık fiziği, bütün o lehimleri, büyük mıknatısları, sıvı helyum ve göstergeleriyle tamircinin gözüne cazip görünebilir. Fakat Shaw'ın gözünde hiçbir yararı olmayan bir konuydu. Kısa bir süre sonra analog bilgisayarını üst kattaki odasına taşıdı ve o oda bir daha asla süper iletkenlik işinde kullanılmadı.

"Yapacağınız tek şey ellerinizi bu düğmelerin üstüne koymak; birdenbire kendinizi bu öbür âlemde kâşiflik yaparken bulursunuz; sanki oraya ilk inen yolcu siz olmuşsunuz ve nefes almak için de yukarı çıkmak istemezsiniz."[8] Bu sözler, Lorenz çekicisini hareket halinde görebilmek için daha ilk günlerinde hemen kalkıp gelen Ralph Abraham adlı matematik profesörüne aitti. Berkeley Üniversitesinin başlangıçtaki en parlak zamanlarında Steve Smale ile beraber orada bulunan Abraham, Santa Cruz fakültesinde, Shaw'un oynadığı oyunun gerçek anlamını kavrayabilecek düzeyde yeterli temel bilgilere sahip olan birkaç fizikçiden biriydi. Shaw'un gösterisi karşısındaki ilk tepkisi, ekrandaki çekici görüntüsünün hızı karşısında duyduğu şaşkınlık oldu; Shaw çekicinin daha da hızlı hareket etmesini frenlemek için fazladan kondansatörler kullandığını ifade etti. Çekici sadece hızlı değil, sağlamdı da. Analog devrelerin kesinlik sağlamayışı dolayısıyla bu özelliği kanıtlanmış oluyordu - düğmeleri ne yavaşça ne de sertçe çevirdiğiniz takdirde çekici kaybolmuyor; gelişigüzel bir hale dönüşmüyor, buna karşılık tutarlılığını yavaş yavaş ifade etmeye başlayan bir şekle dönüşüyor veya böylece bozuluyordu. Abraham, "Roy, tecrübeleri sayesinde, çekicinin bütün esrarının hangi noktada yapılacak birkaç küçük araştırma ile çözüleceğini kendiliğinden biliyordu," dedi. "Önemli kavramların hepsi - Lyapunov üslü sayısı, fraktal boyut - size çok doğal şeyler gibi gelir. Bunları görür görmez hemen araştırmaya başlarsınız."

Bilim bu muydu? Bilgisayarla yapılan ve ne bir formalizm ne de ispat gerektirmeyen bu çalışmanın matematik olmadığı besbelliydi; Abraham gibi kimselerin konuya duydukları yakınlık dolayısıyla yaptıkları teşviklerin de bu durumu değiştireceği yoktu. Fizik fakültesi konunun fizik alanına girdiğini kabul etmek için de herhangi bir neden bulunduğuna inanmadı. Ancak hangi alanda olursa olsun seyircisi eksik olmuyordu. Shaw genellikle kapısını açık bırakırdı; tesadüf bu ya, fizik bölümünün girişi de koridorun tam karşısındaydı. Holde, müthiş bir trafik vardı. Nitekim, Shaw'un çevresinde bazı kimselerin toplanması çok sürmedi.

Kendi kendine Dinamik Sistemler Kulübü adını veren bu grubun - zaman zaman bunlara Kaos Hizbi diyenler de olmuştur - merkez noktasında sükunet timsali Shaw bulunuyordu. Shaw utangaçlığı dolayısıyla üniversite piyasasında fikirlerini ortaya koyarken belirli bir çekingenlik duygusunu aşamıyordu; neyse ki, yeni ortaklarının böyle bir sıkıntısı yoktu. Ancak, bunlar da, henüz tanınmayan bir bilim dalı çerçevesinde daha plânı programı bulunmayan bir araştırma faaliyetini yürütebilmek için sık sık Shaw'a başvurarak onun düşüncelerinden ufuklarını genişletmekte yararlanmaktaydılar.

Doyne Farmer[9] adlı, uzun boylu, iri kemikli, kızıla yakın sarışın bir Teksaslı arkadaşları, içlerinde en rahat konuşan kişi olarak grubun sözcüsü oldu. 1977'de, yirmi dört yaşının bütün enerji ve coşkusuyla dolu bir fikir üretme makinesiydi. Farmer'la ilk tanışanlar başlangıçta zaman zaman onu sırf ağzı iyi laf yapan bir kimse olarak görürlerdi. New Mexico'daki aynı Silver City şehrinde çocuklukları beraber geçen ve kendisinden üç yaş daha da genç olan Norman Packard, o yılın sonbaharında Santa Cruz'a geldi; tam o sıralarda, Üniversiteden bir yıllığına izin alan Farmer, hareket yasalarını rulet oyununa uygulamak için yaptığı planı bütün gücüyle yürürlüğe koymaya çalışmaktaydı. Bu girişiminde ciddi olmasına rağmen gerçekleşmesi imkânsız bir işti. Hem Farmer hem de zaman zaman bazıları değişen bir grup fizikçi arkadaşı, hepsi de tam profesyonel kumarbazlar olarak on yılı aşkın bir süre bu rulet hayaliyle yatıp kalktılar. Farmer Los Alamos Ulusal Laboratuvarında Teorik Çalışmalar Bölümüne girdikten sonra bile bu hayalden vazgeçmedi. Arkadaşlarıyla birlikte rulet masalarının eğimlerini, topların güzergâhlarını hesap ettiler, bu iş için özel yazılımlar yazdılar, olmayınca baştan yazdılar, pabuçların içine bilgisayarlar yerleştirip rulet oynanan kumarhanelerde ömür çürüttüler. Ne yaptılarsa planladıkları şekilde sonuçlanmadı. Zaman zaman, Shaw hariç Kulübün bütün üyeleri var olan bütün enerjilerini rulet masasında tükettiler; bu proje sayesinde dinamik sistemleri hızla analiz etmekte olağanüstü tecrübe

kazanıp bir nevi eğitim görmüş oldukları söylenebilirse de aslında Santa Cruz Fizik Fakültesindeki genel kanı Farmer'ın bilimi ciddiye almadığı şeklindeydi.

Grubun dördüncü üyesi aralarındaki en genç ve Kaliforniya doğumlu tek kişi olan James Crutchfield idi. Kısa boylu, tıknaz yapılı, iyi sörf yapan bu gencin grup açısından en önemli yeteneği doğuştan tam bir bilgisâyar üstadı olmasıydı. Crutchfield Santa Cruz'a lisans öğrenimi yapmaya gelmiş, öğrenciliği sırasında Shaw'un kaos öncesi süper iletkenlik deneylerinde laboratuvarda asistanlık yapmış, (Santa Cruz'da söylendiği şekliyle) "tepenin ötesine," IBM'in San Jose'deki araştırma merkezinde bulduğu bir işe bir yıl süreyle her gün taşınıp durmuş, lisansüstü düzeyinde öğrenci olarak fizik bölümüne fiilen ancak 1980 yılında gelmişti. O tarihten önce, iki yıl kadar Shaw'un laboratuvarına takılmış, dinamik sistemleri anlayabilmek için gerek duyduğu matematik bilgisini kapma gayreti içinde olmuştu. Crutchfield de, aynı grubun diğer üyeleri gibi, fizik bölümünün standart çizgisinin epeyi dışına çıkan bir yol izledi.

Fizik bölümü, Shaw'un süper iletkenlik tezini tamamlamaktan vazgeçtiğinden, ancak 1978 yılının ilkbaharında emin olabildi. Aslında tezi bitirmek üzereydi. Fakülte yönetiminin kanaati, onun bu konudan sıkılmış olup olmadığına bakmadan, formaliteleri bir an önce tamamlayabileceği, doktora tezini verip hayata atılabileceği şeklindeydi. Kaosa gelince, bu konunun bilimsel disipline uygunluğu hususunda soru işaretleri vardı. Santa Cruz'da, daha adı bile olmayan bu alanda uygulanacak bir ders programını yönetebilecek nitelikte hiç kimse yoktu. Bu konuda daha yapılmış hiçbir doktora tezi yoktu. Bu alanda uzmanlık kazanmış kimselerin mezun olduktan sonra nerede iş bulabilecekleri belli değildi. Sonra bir de, para sorunu vardı. Amerika'daki bütün üniversiteler gibi, Santa Cruz'da da fizik araştırmalarına, genellikle National Science Foundation (Ulusal Bilim Kurumu) ve diğer Devlet kuruluşları tarafından kaynak sağlanır; bu kaynaklar öğretim üyelerine araştırma yapmaları için hibe şeklinde verilen ödeneklerden oluşur.[10] Temel araştırmalar

için büyük miktarlarda ödenek ayıran Deniz Kuvvetleri, Hava Kuvvetleri, Enerji Bakanlığı, Merkezi Haberalma Teşkilatı (CIA) gibi kurumlar için, araştırma sonuçlarının derhal hidrodinamik, aerodinamik, enerji ya da istihbarat konularında uygulama alanına konmasının çok fazla önemi yoktur. Fakültedeki öğretim üyesi bir fizikçi, laboratuvara gerekli ekipmanı satın almaya ve araştırmada kendisine yardımcı olan personelin - hibeden paylarına bir şeyler düşen doktora öğrencilerinin - aylıklarını ödemeye yetecek kadar para alır. Yardımcılarının fotokopi giderlerini, toplantılara katılmak için yaptıkları seyahatların harcamalarını, hatta yaz aylarında geçinebilmeleri için gerekli masrafları bile hep bu paradan karşılar. Bu para desteği olmasa öğrencinin hali perişandır. İşte şimdi, Shaw, Farmer, Packard ve Crutchfield bu sistemle köprüleri tamamen atmış oluyorlardı.

Geceleri kaybolmaya başlayan birtakım elektronik ekipmanı bulmak isteyenin Shaw'un eski düşük sıcaklık laboratuvarına bakması yeterdi. Arada sırada Kulübün üyelerinden biri mezun öğrenciler derneğinden bir yüz dolar çekmeyi başarabiliyor ya da Fizik Bölümü kitabına uydurup o kadarcık para veriyordu. Böylece ploter, konvertisör, elektronik filtre gibi cihazlar birikmeye başladı. Koridorun öbür ucundaki parçacık fiziği gruplarından birinde, hurda olarak kaydı terkin edilecek olan küçük bir dijital bilgisayar vardı; o da bir yolunu bulup soluğu Shaw'un laboratuvarında aldı. Farmer başka bölümlerden bedava bilgisayar zamanı tırtıklamakta uzman oldu. Bir yaz Colorado'nun Boulder şehrindeki Ulusal Meteoroloji Araştırmaları Merkezi'ne davet edildiğinde, global düzeyde hava durumu modellemesi gibi muazzam araştırma programlarıyla çalışan dev bilgisayarlara girip bunların pahalı zamanından kendine hortumlayabilme konusunda gösterdiği yetenek iklim bilimcilerin bile akıllarına durgunluk vermişti.

Santa Cruzluların el becerilerine yatkınlığı işlerine epeyi yaradı. Shaw'un çocukluğu pek uslu geçmiş sayılmazdı.[11] Packard daha çocukken Silver City'de televizyon tamirciliği yapmıştı. Crutchfield bilgisayar işlemcilerinin mantığını do-

ğal bir dil gibi anlayan ilk nesil matematikçilerdendi. Etrafı sekoya ağaçlarıyla çevrili olan Fizik bölümü binasının da her yerde rastlayacağınız fizik bölümü binalarından farkı yoktu; burada da boya ve badanası hep eksik kalmış hissini veren beton zemin ve duvarların çevrelediği klasik atmosfer hâkimdi; ne var ki, kaos grubu, devraldığı odada yığın yığın kâğıtlar, duvarlarda Tahitili yerlilerin resimleri, son olarak da garip çekicilerin bilgisayar çıktıları ile tamamen kendine özgü bir atmosfer yaratmıştı. Gece gündüz demeden, aslında gündüzden daha da güvenli olduğu için tercihen gece saatlerinde bu odayı ziyaret etseniz göreceğiniz manzara, devreleri yeniden ayarlayan, bağlantı kablolarını çekiştirip çıkaran, bilinci ya da evrimi tartışan, osiloskoplardan birinin ekranını ayarlayan ya da parlak yeşil bir lekenin ışıktan bir eğri çizerek titrek bir yörünge üzerinde sanki canlı bir şeymiş gibi çırpındığını seyreden grup üyeleri olurdu.

Farmer, "Hepimizi çeken aynı şey oldu: Sanki determinizmi bulabilecekmişsiniz gibi bir anlayış, ama tam öyle de değil," diyordu. "Bize öğretilen bütün bu klasik sistemlerden nasıl olup da gelişigüzellik çıktığı fikri bize bilmece gibi geliyordu. Bunu yapanın ne olduğunu anlama gayreti içindeydik.

"Altı, yedi yıl süren klasik bir fizik öğreniminden geçip beyniniz yıkanmadıkça bunun zihninizde nasıl bir ufuk açtığını değerlendirmeniz mümkün değildir. Size başlangıç durumunun her şeyi belirlediği birtakım klasik modellerin var olduğu anlatılır; sonra bir de kuantum mekaniği modelleri vardır ki bunlarda her şey belirlidir, ancak bunda yetinmek zorunda olduğunuz limit, başlangıç durumu hakkında ne kadar enformasyon toplayabildiğinizdir. *Nonlineer* kelimesi ancak fizik kitabının arka kapağında karşılaşacağınız bir kelimeydi. Fizik öğrencisi matematik dersi aldığında, nonlineer denklemleri ancak son derste görürdü. Genellikle o da üstünkörü okunup geçilirdi; geçmediyseniz size yaptıracakları şey bu nonlineer denklemleri alıp lineer denklemlere indirgemekti; böylece nasıl olsa yaklaşık birtakım çözümlere ulaşırdınız. Aslında, bu çalışma insanda hayal kırıklığı yaratıyordu.

"Nonlineerliğin bir modele getirdiği gerçek farkın ne olduğu hakkında hiçbir fikrimiz yoktu. Bir denklemin gözle görülürcesine gelişigüzel bir tarzda bir yerden başka bir yere zıplayarak dolaşabildiğini bilmek hakikaten müthiş bir duyguydu. İnsanın aklından şöyle demek geçiyordu: 'Bu gelişigüzel hareket nereden geliyor? Bunu denklemlerde görmüyorum ki.' Sanki hiçten bir şeydi ya da hiçten çıkmış gibi bir şeydi."

Crutchfield ise şöyle diyordu: "Mevcut çerçevenin içine hiç oturmayan tüm bir fiziksel tecrübe âlemi bulunduğunun bilincine varmıştık. Neden bize öğretilenler arasında bu yoktu ki? Dünyaya kendi yakın çevremizden bakıp bir şeyleri nihayet anlamak fırsatı elimize geçmişti; bu dünya o kadar alelâde idi ki bu haliyle mükemmeldi."

Grubun bu dört üyesi yaptıklarıyla hem kendileri eğleniyor hem de determinizm, zekânın doğası, biyolojik evrimin yönü konusundaki sorularıyla profesörlerini şaşırtıyorlardı.

Packard, "Bizi bir arada tutan duygu uzun görüşlü bir vizyona sahip olmamızdı. Klasik fizikte son kertesine kadar analiz edilmiş olan düzenli fiziksel sistemleri aldığınızda, parametre uzayında bir nebze bile sapsanız karşınıza öyle bir şey çıkar ki, buna bu analiz hengâmesinin tamamını uygulamanıza imkân yoktur.

Kaos fenomeni aslında bundan çok daha önceleri keşfedilebilirdi. Keşfedilemedi, çünkü düzenli hareketin dinamiği üzerinde yapılan bu muazzam çalışmalar bilim adamlarının bu yönde ilerlemesine imkân vermedi. Siz yeter ki bakın, aslında kaosun orada olduğunu göreceksiniz. Bizim ne gibi bir teorik tablo oluşturabileceğimizi görmemiz için, kendimizi fizikle, gözlemlerle yönlendirmemiz gerektiğini kaos sayesinde anlamış bulunuyoruz. Uzun vâdede, biz komplike dinamiğe ilişkin araştırma ve sorgulamaları, asıl gerçek komplike dinamiği anlamamızı sağlayabilecek kapıyı açan bir anahtar olarak görüyorduk."

Farmer da şu sözleri ilave ediyordu: "Felsefi düzeyde bu konunun beni şaşırtan yönü, serbest iradeyi tanımlamanın uygulamaya dönük bir yöntemini teşkil etmesi; bu tanımla-

mayı da, serbest irade ile determinizmi birbiriyle bağdaştıracak bir şekilde yapmasıdır. Elinizde determinist bir sistem vardır, fakat bir an sonra ne yapacağını bilemezsiniz. Aynı zamanda, ben daima dünyadaki önemli sorunların, gerek gerçek hayatta gerek zihin çerçevesinde organizasyon kurma konusuna ilişkin olduğunu düşünmüşümdür. İyi de okulda bunu nasıl okudunuz? Biyologların çalışmaları çok fazla uygulamaya dönük ve özel nitelikli görünüyordu; kimyacılar muhakkak bunu okumuyordu; matematikçiler hiç okumuyordu; hatta fizikçilerin de okumadığı bir şeydi. Benim kanımca, organizasyonun kendi kendine kurulup ortaya çıkması fiziğin konusuna dahil edilmeliydi.

"Bu madalyonun bir de arka yüzü olduğunu hatırlamakta yarar vardı. Şu tarafta düzen bulunuyordu, içinden gelişigüzellik çıkmaktaydı, bir adım ötede ise gelişigüzelliği görüyordunuz; onun da altında kendi kurulu düzeni vardı."

Shaw ve meslektaşları bu samimi coşkularını bilimsel bir program haline getirmek zorundaydılar. Bunun için, cevabı bulunan sorular sormaya, daha doğrusu cevaba değer sorular sormaya mecburdular. Teori ile deney arasında kapatılması gereken bir mesafe olduğuna inandıkları için, bunları birbiriyle ilişkilendirmenin çarelerini aradılar. Hatta daha başlamadan önce, neyin bilindiğini, neyin bilinmediğini öğrenmek zorundaydılar ki, sadece bu bile başlı başına muazzam bir meseleydi.

Önlerindeki en büyük engel, iletişimin bilimde adım adım ilerleme eğilimiydi; özellikle yeni bir konu bir bilim dalı içindeki birkaç alt disiplini birden ilgilendiriyorsa bu eğilim iyice ayak bağı oluyordu. Çoğu zaman, yeni bir alana mı girdiklerini yoksa hâlâ eski konularda mı gezindiklerini bile bilemiyorlardı. Georgia Institute of Technology'de (Georgia Teknoloji Üniversitesi) kaosun hararetli bir müdafii olan Joseph Ford onların bu cahillik derdine karşı paha biçilmez bir derman olmuştur. Ford'un, fiziğin geleceğinin - bütün geleceğin - nonlineer dinamikte olduğu konusundaki inancı daha çok önceden pekişmiş[12] ve dergilerde bu konuda yayınlanan makaleleri biriktirip bir nevi enformasyon merkezi hali-

ne gelmişti. İhtisası, sönümsüz kaos yani astronomik sistemlerdeki ya da parçacık fiziğindeki kaos üzerineydi. Sovyet ekolu çerçevesinde yapılan çalışmalar hakkında olağanüstü derinlikte bilgi sahibiydi; bu yeni girişimin temel felsefesini uzaktan paylaşan kim varsa onunla temas kurmayı da kendi üzerine vazife edinmişti. Her yerde arkadaşları vardı. Hangi bilim adamı nonlineer bilim hakkında makale göndermişse o makalesi mutlaka Ford tarafından kısaltılıp hacmi gittikçe kabaran makale özetleri listesine dahil edilirdi. Bizim Santa Cruzlu öğrenciler Ford'un böyle bir listesi olduğunu öğrenince posta kartı şeklinde bir form hazırlayıp makale yazarlarından, yayınevine gönderdikleri makale müsvettelerinden kendilerine birer kopya istediler. Kısa bir süre sonra kopyalar yağmaya başladı.

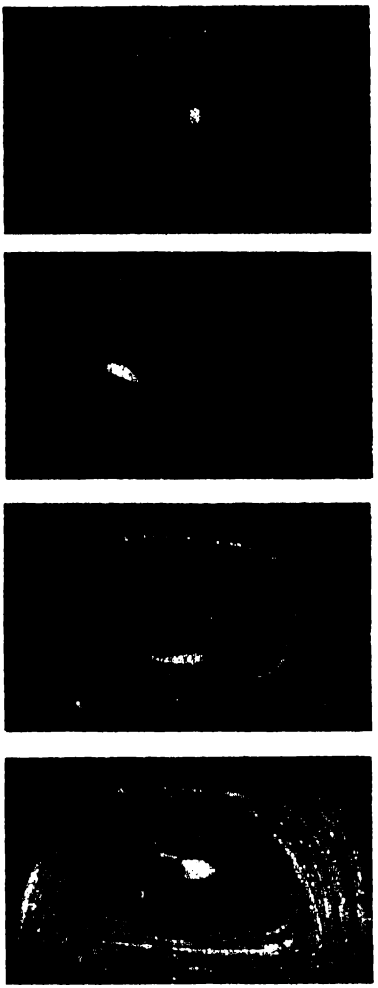
Shaw ve arkadaşları, garip çekiciler hakkında sorulabilecek çok çeşitli sorular olduğunun bilincine vardılar.[13] Ne gibi karakteristik şekilleri vardır? Topolojik yapıları nedir? Bunlarla ilişkili dinamik sistemlerin fiziği hakkında geometrinin verebileceği bilgiler nelerdir? İlk yaklaşımları Shaw'un başlangıçta yaptığı gibi kolları sıvayıp araştırmayı kendileri uygulayarak gerçekleştirmekti. Matematik literatürünün büyük bölümünde yapı sorunu doğrudan doğruya konu olarak alınıyordu, ancak, matematiğin yaklaşımı çok ayrıntılı olduğu için Shaw buna tepki gösteriyor; hep ağacın çok fazla, ormanın ise az olduğunu düşünüyordu. Literatür taraması yaparken, matematikçilerin kendilerine özgü gelenekleri içinde yeni hesaplama araçlarına sahip olmak gibi bir imkândan yoksun olduklarını; bu yüzden de, özellikle yörüngelerin yapılarının karmaşıklığı içinde, bir yandan sonsuzluk öte yandan süreksizlik karşısında boğulup kaldıklarını anlar gibi olmuştu. Matematikçiler analog belirsizliğe özellikle pek fazla önem vermiyorlardı; oysa fizikçilerin gözünde, aslında gerçek dünyadaki sistemleri kontrol eden bu belirsizlikti. Shaw osiloskopunda tek tek yörüngeleri değil, yörüngeleri içine sarmalamış bulunan bir zarf gördü. Düğmeleri yavaşça çevirirken bu zarf da değişiyordu. Ortaya çıkan katlanmalar ve bükülmelerin matematiksel topoloji dilini

kullanarak kesin bir izahını yapması mümkün değildi. Fakat gene de bunları anlamaya başladığını hissetti.

Fizikçi için önemli olan ölçümler yapabilmesidir. Öyle ama, bu uçan, kaçan resimlerin nesini ölçeceklerdi? Shaw ve arkadaşları garip çekicileri bu kadar büyüleyici hale getiren özel nitelikleri izole etmeyi denediler. *Başlangıç durumuna hassas bağımlılık* - birbirine yakın güzergâhların birbirinden uzaklaşma eğilimi. Lorenz'i uzun süreli determinist hava durumu tahmini yapmanın imkânsız olduğu hususunda ikna eden nitelik bu idi. İyi de, böyle bir özelliği ölçecek kumpasler neredeydi? Öngörülemezliğin bizzat kendisini ölçmek mümkün müydü?

Bu sorunun cevabı, Lyapunov üslü sayısı adıyla bilinen Rusya'dan gelme bir kavramın içindeydi. Bu sayı sırf öngörülemezlik gibi kavramlara tekabül eden topolojik nitelikler için bir ölçü oluşturuyordu. Bir sistemin içindeki Lyapunov üslü sayıları, bir çekicinin faz uzayındaki gerilme, kasılma ve katlanmalarının birbirine zıt etkilerini ölçmek için bir imkân sağlıyordu. Bir sistemi istikrar veya istikrarsızlık durumuna yönelten bütün özelliklerin resmini çıkarıyordu. Üslü sayı sıfırdan büyük ise gerilmeyi ifade ediyordu - birbirine yakın noktalar birbirinden ayrılmaktaydı. Üslü sayı sıfırdan küçük ise kasılmayı ifade ediyordu. Sabit noktalı bir çekici için, bütün Lyapunov üslü sayıları negatif değer taşıyordu, çünkü sonlardaki istikrarlı duruma yaklaşıldıkça çekme yönü içeriye doğruydu. Periyodik yörünge biçimindeki bir çekicide bir üslü sayının değeri tam sıfır, diğer üslü sayıların değerleri ise negatifti. Böylece, bir garip çekicide en azından bir pozitif Lyapunov üslü sayısı bulunması gerektiği ortaya çıkmış oldu.

Bizim Santa Cruzlu öğrenciler bu fikri kendilerinin keşfetmediğine yanmakla birlikte, mümkün olan en pratik yoldan bunu geliştirmeyi başardılar ve Lyapunov üslü sayılarının nasıl ölçüleceğini öğrenerek bu sayıları diğer birtakım önemli özelliklerle ilişkilendirdiler. Dinamik sistemlerde düzen ve kaosun nasıl bir ritime uyarak bir araya geldiklerini bir filmde gösterebilmek için bilgisayarlı animasyonlar



KAOTİK KARIŞIM. Peltemsi bir damla hızla karışmaktadır; merkezin daha yakınında olan başka bir peltemsi damla, hemen hemen karışmamaktadır. Julio M. Ottino'nun ve diğer bazı araştırıcıların gerçek akışkanlarla yaptığı deneylerde, karışma sürecinin - doğanın her tarafında ve sanayide görülen fakat hâlâ pek iyi anlaşılamamış olan bir sürecin - kaosun matematiksel niteliğiyle sıkı sıkıya bağlantılı olduğu ortaya çıkmıştır. Görülen şekiller Smale'in at nalı haritasına benzeyen gerilip uzama ve katlanma özelliklerini ortaya koymaktadır.

yaptılar. Gerçekleştirdikleri analizler, bazı sistemlerin bir yönde düzensizlik yaratırken bir başka yönde nasıl tertipli ve metodik çerçevede kalabildiğini gayet canlı bir biçimde ortaya koyuyordu. Filmlerden birinde, sistem evrime uğradıkça, bir garip çekici üzerindeki birbirine yakın noktalardan (bu noktalar başlangıç durumunu temsil ediyordu) oluşan küçücük bir kümenin başına neler geldiği görülüyordu. Küme dağılmaya ve odak noktasını kaybetmeye başlıyordu. Önce bir benek halini alıyor, sonra da peltemsi bir damla oluyordu. Bazı tür çekicilerde, bu pelte hızla her tarafa yayılıyordu. Bu tür çekiciler *karışma* bakımından etkinliği olan çekicilerdi. Buna karşılık, diğer bazı çekicilerde pelte sadece belirli bazı yönlerde yayılıyordu. Bu peltemsi damla, bir ekseni üzerinde kaotik, diğer ekseni üzerinde düzenli bir şerit haline geliyordu. Sanki sistemde biri düzenli diğeri de düzensiz iki itici güç vardı ve bunlar birbirinden kopmaktaydı. Güçlerden biri gelişigüzel öngörülemezliğe doğru iterken diğeri de zamanı çok dakik bir saat gibi muhafaza ediyordu. Bu itici güçlerin ikisini de tanımlamak ve ölçmek mümkündü.

Santa Cruz'un kaos araştırmaları üzerinde bıraktığı en karakteristik iz, 1940'lı yılların sonlarında Bell Telephone Laboratuvarlarında çalışan Claude Shannon'un icat ettiği enformasyon teorisi adıyla bilinen matematikle felsefe karışımı bir kuramdı. Shannon eserine "Matematiksel İletişim Teorisi" adını vermiş, ancak enformasyon denen özel bir miktarla ilişkili olduğu için, enformasyon teorisi[14] adı daha çok tutmuştu. Bu teori elektronik çağının ürünlerinden biriydi. İletişim hatları ve radyo transmisyonları belirli bir şeyi taşıyordu; bilgisayarlar da yakında bu aynı şeyi delikli kartlar veya manyetik silindirler üzerinde depolamaya başlayacaktı; bu şeye bilgi veya anlam demek de doğru olmazdı. Bunun temel birimleri fikir de değildi kavram da değildi; hatta, mecburen olması gereken kelime veya sayı da değildi. Bu şey his veya hissizlik de olabilirdi - buna rağmen mühendisler ve matematikçiler bunu ölçebilmekte, iletebilmekte ve transmisyonun doğruluğunu test etmekteydi. Başka bir keli-

me yerine enformasyon kelimesinin olması aslında pek fazla fark etmiyordu, fakat insanların da, belirli bir değeri olmayan, mutat olduğu üzere olguları, öğrenmeyi, hikmeti, anlamayı, aydınlanmayı çağrıştırmayan özel bir terim kullandıklarını hatırlamaları gerekliydi.

Teorinin şekli ellerindeki donanıma göre belirleniyordu. Enformasyon şimdi adına bit denen ikilik açık-kapalı kontaklarda depolanmaktaydı; sonra bit, enformasyonun temel ölçüsü olarak kabul edildi. Teknik açıdan bakıldığından, enformasyon teorisi, gelişigüzel yanlışlar biçiminde ortaya çıkan gürültü ile bit akışının birbirine nasıl girişim yaptığını kavramaya yarayan bir anahtar görevi görüyordu. İletişim hatları, kompakt diskler veya dili, sesleri ya da görüntüleri kodlayan teknolojilerden herhangi biri için gerekli olan taşıma kapasitesini öngörmeye imkân sağlıyordu. Yanlışları düzeltmeye yarayan - mesela bazı bitleri kullanarak başka bitleri kontrol etmek gibi - çeşitli programların etkinliğini değerlendirmek için teorik bir araç olmak durumundaydı. "Gereğinden fazlalık" gibi çok önemli bir anlayış üzerinde ısrarla duruyordu. Shannon'un enformasyon teorisine göre, normal dilin içinde mesajı iletmek için hiç de gerekli olmayan sesler ya da harfler biçiminde birtakım fazlalıklar vardır ki bunlar normal dilin yüzde elliden fazlasını oluşturur. Bu yabancısı olmadığımız bir görüştür; mırıltılar ve tipografi hatalarıyla dolu bir dünyada normal iletişimin kaderini bu fazlalıklar belirler. Steno eğitimi için yapılan meşhur - *if u cn rd ths msg** . . . - reklâmında bu nokta açıkça ortaya konduğu gibi enformasyon teorisi de bunun ölçülmesini mümkün kılmıştır. Gereğinden fazlalık gelişigüzelden öngörülebilir şekilde bir kopuşu ifade eder. Normal dildeki gereğinden fazlalığın bir kısmı o dilin anlamında bulunmaktadır; dilin bu kısmını sayıya dönüştürmek çok güçtür; çünkü, bunun temelinde insanların hem kendi dilleri hem de dünya hakkındaki edindikleri ortak bilgiler vardır. İnsanlar dilin bu kısmı sayesinde çapraz bulmacaları çözebilmekte ya da a

*Bu mesajı okuyabiliyorsanız ... İngilizce *If you can read this message* kelimelerinin fonetik transkripsiyonu. (ç.n.)

harfinin arkasındaki boşlukları doldurup aranan kelimeyi bulabilmektedir. Buna karşılık başka tür gereğinden fazlalıklar vardır ki bunlara sayısal ölçüleri uygulamak çok daha kolaydır. İstatistik bakımından, İngilizcede bir harfin "e" olma ihtimali başka harflere oranla yirmi altı katından çok daha yüksektir. Ayrıca, harfleri birbirinden soyutlanmış birimler olarak saymamak gerekir. İngilizce bir metindeki bir harfin "t" olduğunu bilirseniz bir sonraki harfin "h" ya da "o" olabileceğini öngörmenize yardımcı olur; iki harfi bilirseniz daha da fazlasını öngörmenize yardımcı olur ve bu böyle devam eder. Bir dilde iki ve üç harfli çeşitli kombinasyonların istatistik olarak meydana çıkma eğilimi, o dilin esasındaki karakteristik özelliklerden bazılarını anlamayı sağlamaktadır. Üç harfin kaç şekilde sıralanmasının mümkün olduğuna bakılıp sırf bu ihtimale göre programlanmış bulunan bir bilgisayar öylesine gelişigüzel bir anlamsızlık akımı üretir ki, bunun *İngilizce* bir anlamsızlık olduğunu hemen anlarsınız. Kriptoloji uzmanları uzun bir süre, basit şifreleri çözmek için bu gibi istatistik kalıplarını kullanmışlardır. İletişim mühendisleri şimdi bunları verileri sıkıştırmak, bir iletişim hattı ya da depolama diski üzerinde gereksiz fazlalıkları kaldırıp yer kazanmak için teknikler tasarlamak amacıyla kullanmaktadır. Shannon'a göre, bu tür kalıplara bakmanın en doğru şekli şuydu: Normal dille ifade edilmiş bir veri akımında gelişigüzellik yoktur; her yeni bit kısmen bir önceki bit tarafından sınırlanmaktadır; böylece her yeni bit, bir bitin taşıyabileceği gerçek enformasyon miktarından daha azını taşımaktadır. Bu ifade biçiminde çok belirgin olmayan bir çelişki seziliyordu. Veri akımındaki gelişigüzellik arttıkça her yeni bitin ileteceği enformasyon miktarı da artıyordu.

Shannon'un enformasyon teorisi, hem bilgisayar çağının ilk başladığı dönemlerdeki teknik sorunlara cevap verebilmiş hem de, mütevazi ölçülerde de olsa felsefi bir boyut kazanmıştır; üstelik bu teorinin Shannon'un ihtisas alanı dışında kalan araştırıcılara en cazip gelen şaşırtıcı yönünü tek bir kelimenin seçilmiş olmasıyla izah edebiliriz: Entropi. Warren Weawer'in enformasyon teorisi hakkında yazdığı klasikleşmiş bir

yazıda belirttiği gibi, "İletişim teorisinde entropi kavramıyla karşılaştığınızda, biraz heyecan duymaya hakkınız vardır - bu hak, esaslı ve önemli çıkması ihtimali olan bir şeyi yakalamış olduğunuz düşüncesinden doğan bir haktır."[15] Entropi kavramı termodinamikten alınmıştır; İkinci Yasanın, yani hem evrenin hem de evren içinde yalnız bırakılmış bütün sistemlerin tedricen artan bir düzensizlik durumuna doğru amansızca kayma eğiliminde olması şeklindeki termodinamik yasasının bir uzantısını meydana getirmektedir. Bir yüzme havuzunu ortadan bölüp iki bölüm arasına bir engel koyun; bir bölümünü suyla diğer bölümünü mürekkeple doldurun; hepsinin tamamen durulmasını bekleyin; aradaki engeli kaldırın; sırf moleküllerin basit gelişigüzel hareketleri yüzünden, mürekkeple su sonunda birbirine karışacaktır. Kıyamete kadar da bekleseniz karışma olayı hiçbir zaman tersine dönmez, bu yüzden İkinci Yasa hep, fizikte, zamanı tek yönlü bir gidiş haline getiren bölüm olarak görülmüştür. Entropi İkinci Yasaya uygun olarak artış gösteren sistemlerin niteliğine verilen isim olmuştur- karışma, düzensizlik, gelişigüzellik. Bu kavramı sezgilerin yardımıyla kavramak gerçek durumlarda ölçmekten daha kolaydır. İki maddenin karışma düzeyini belirlemek için güvenli bir test nasıl yapılabilir? Birtakım örneklemler alıp her birindeki molekülleri saymayı düşünebilirsiniz. Ama ya bunlar evet-hayır-evet-hayır-evet-hayır-evet-hayır şeklinde dizilmişlerse? Bu entropinin yüksek olduğunu söylemek zordur. Sadece çift molekülleri sayabildiğinizi düşünelim, peki ya bunlar evet-hayır-hayır-evet-evet-hayır-hayır-evet şeklinde dizili iseler? Düzenin geldiği şekil dosdoğru sayabilme algoritmasına karşı çıkar. Enformasyon teorisinde anlam ve temsil sorunları olmadık komplikasyonlar çıkarmaktadır. 01 0100 0100 0010 111 010 11 00 000 0010 111 010 11 0100 0 000 000 . . . şeklindeki bir ardışık dizi ancak Mors alfabesini ve Shakespeare'i bilen bir gözlemcinin gözüne düzenli görünebilir. Peki ya, bir garip çekicinin topolojik bakımdan bozuk kalıplarına ne demeli?

Robert Shaw'a bakılırsa garip çekiciler enformasyon motorlarıydı. Shaw'un ilk ve en müthiş yaklaşımına göre, kaos,

enformasyon teorisinin termodinamikten çıkardığı fikirleri yepyeni bir biçimde tekrar fiziksel bilimlere döndürmenin doğal bir yolunu teşkil ediyordu. Düzen ile düzensizliği birbiriyle kaynaştıran garip çekiciler bir sistemin entropisini ölçme sorununa değişik bir bakış açısı getiriyordu. Garip çekiciler karıştırıcı görevini etkin olarak yapıyorlardı. Öngörülemezlik yaratıyorlardı. Entropi çıkartıyorlardı. Shaw'un da bulduğu gibi, hiç enformasyon olmayan yerde enformasyon yaratıyorlardı.

Norman Packard bir gün *Scientific American* dergisini okurken, Louis Jacot yarışması adlı bir deneme yazma yarışması ilanı gördü.[16] Evrenin, galaksiler içindeki galaksiler şeklindeki yapısı hakkında bir teori tasarlamış olan bir Fransız bankacısının kurduğu vakıf tarafından verilen dolgun ödüllü bu yarışmaya, zoraki de olsa katılmaktan başka çare yoktu. Yarışmaya girmek için Jacot'nun temasına ilişkin - konusu ne olursa olsun - bir deneme isteniyordu. (Farmer, "Bir para babasının kaprisi gibi bir şeydi," demişti.) Buna karşılık, yarışmanın jürisi Fransız bilim çevrelerine mensup epeyi ünlü kişilerden oluşmaktaydı; ödül olarak konan para miktarı da yabana atılacak cinsten değildi. Packard ilanı Shaw'a gösterdi. Yarışmaya katılmak için son tarih 1978'in yılbaşına kadardı.

Kulübün üyeleri şimdiye kadar, Santa Cruz'da sahile yakın çok büyük ve eski bir evde düzenli aralıklarla toplanıyordu. Evde bit pazarından alınmış eşyalar ve bilgisayar donanımları vardı; bunların birçoğu da rulet meselesine tahsis edilmişti. Evde Shaw'un da bir piyanosu vardı; bunda barok müziği çalar ya da klasikle modern müziği birbirine karıştırıp o an içinden geldiği gibi uydurduğu parçalar çalardı. Bu genç fizikçiler toplantılarında geliştirdikleri çalışma tarzı çerçevesinde, akıllarına gelen düşünceleri ortaya atıp bunları pratikliği yönünden süzgeçten geçirerek eliyorlar, bunlarla ilgili literatürü okuyorlar ve kendi kendilerine makaleler kaleme alıyorlardı. Sonunda dergilere makale yazma konusunda, hiçbirinin gururunu rencide etmeden epeyi etkin bir şekilde işbirliği yapmayı öğrendiler, ilk makaleyi yazan da Shaw oldu; ancak

Shaw, yazdığı çok az sayıdaki makaleden biri olan bu yazısını tam karakterine uygun olarak kendine sakladı. Gene karakterine uygun olarak, bu makale gecikmişti.

1977 Aralık ayında Shaw Santa Cruz'dan ayrılıp New York Bilimler Akademisinde kaos hakkında düzenlenen ilk toplantıya katılmak üzere yola çıktı.[17] Süper iletkenlik çalışmasının danışmanlığını yapan hocası bilet parasını ödedi; Shaw davetsiz olarak katıldığı bu toplantıda sadece yazılarından tanıdığı bilim adamlarını bizzat dinleme fırsatını buldu. David Ruelle. Robert May. James Yorke. Shaw bu kişilerin karşısında duyduğu hayranlığın yanı sıra, Barbizon Otelindeki odasına 35 dolar gibi astronomik bir para ödediği için dehşet içindeydi. Konferanstaki konuşmaları dinlerken bir yandan, bu adamların akla sığmayacak kadar ayrıntılı olarak işledikleri fikirleri kendi başına cahilce yeniden keşfetmeye kalkıştığı düşüncesiyle pişmanlık duyuyor, öte yandan kendisinin de bu konuya katkı yapabilecek önemli bir yeni görüşü olduğu duygusuyla gururlanıyordu. Enformasyon teorisine ilişkin makalesinin bitmemiş bir müsvettesini yanında getirmişti; kâğıt parçaları üzerine karaladığı müsvetteyi bir dosya içine koymuştu; hemen bir daktilo makinesi bulmaya kalkıştı; önce otelden sonra civardaki tamircilerden aradıysa da bulamadı. Sonunda giderken dosyasını da yanında götürdü. Daha sonraları, konferansta neler olup bittiğini soran arkadaşlarına, en önemli an olarak Edward Lorenz'in onuruna verilen akşam yemeğini anlattı; Lorenz böylece, yıllar boyu kendisinden esirgenen şan ve şerefe nihayet kavuşmuş oluyordu. Lorenz, utana sıkıla karısının elini tutarak yemek salonuna girdiğinde bütün bilim adamları ayağa kalkarak onu uzun uzun alkışladılar.[18] Shaw, meteoroloji uzmanının nasıl dehşet içinde kaldığını görüp şaşırmıştı.

Shaw, birkaç hafta sonra, ailesinin tatillerde gittikleri evlerinin bulunduğu Maine eyaletine gitmişken, makalesini nihayet postaya verip[19] Jacot yarışmasına yolladı. Yılbaşı geçmiş olmasına rağmen, bulundukları yerdeki posta müdürü efendilik yapıp zarfın üzerine eski tarihli bir mühür basmıştı. Aslında dar bir çevreye hitap eden matematik ve na-

zari felsefe karışımı bir metinle Shaw'un kardeşi Chris'in çizdiği karikatürümsü resimlerden oluşan bu makale değeri yüksek bir mansiyona layık görüldü. Shaw'a verilen oldukça dolgun para ödülü, mansiyonunu almak üzere Paris'e seyahat etmesine yetecek miktardaydı. Gerçekleştirdiği başarı belki gözde çok fazla büyütülecek bir şey değildi, fakat grubun Fizik Bölümüyle ilişkilerinin çok sıkıntılı olduğu bir anda gelmişti. Ortaklık üyeleri dışa karşı güven telkin edebilmek için var güçleriyle birtakım arayışlar içindeydiler. Farmer astrofizikten vazgeçiyor, Packard istatistiki mekanikten kopuyor, Crutchfield ise doktora programına kaydolmaya hâlâ cesaret edemiyordu. Fizik Bölümü işin artık çığırından çıktığını hissetti.

"Garip çekiciler, Kaotik Davranış ve Enformasyon Akışı" enformasyon teorisi ile kaosu birbirine mezcetmek üzere alın teri dökülüp gerçekleştirilmiş ilk eser olarak o yıl elden ele dolaştı; makalenin baskıya giden müsvettesinden 1000'e yakın örnek dağıtıldı.

Shaw klasik mekaniğin bazı varsayımlarını gün ışığına çıkardı. Doğal sistemlerdeki enerji iki düzeyde mevcuttur: Birincisi makro ölçektir, bunda her günkü nesneleri saymak ve ölçmek mümkündür; ikincisi ise mikro ölçektir, bunda sayısız atom gelişigüzel bir hareketle yüzer; ortalama bir büyüklük olan sıcaklık hariç, bu hareketin ölçülmesi imkânsızdır. Shaw'un belirttiği gibi, mikro ölçeklerde mevcut olan toplam enerji makro ölçeklerin enerjisinden daha ağır basabiliyordu, ne var ki, bu termal hareketin klasik sistemlerde yeri yoktu; izole edilmiş ve kullanılmaz bir haldeydi. Ölçeklerin birbiriyle iletişimi yoktur. Shaw, "Klasik bir mekanik problemini çözmek için insanın sıcaklığı bilmesi gerekmez," demişti. Bununla birlikte, Shaw, kaotik ve yarı kaotik sistemlerin makro ölçeklerle mikro ölçekler arasındaki uçurumu kapattığı görüşündeydi. Kaos enformasyonun yaratılışı idi.

Suyun bir engeli aştıktan sonra akışını gözümüzün önüne getirelim. Bütün hidrodinamikçilerin ve azgın nehirlerde kanoya binen sporcuların gayet iyi bildiği gibi, su yeterince hızlı akıyorsa girdaplar oluşturur. Belirli bir hızla aktığında

girdaplar aynı yerde kalır. Suyun akış hızı artınca, girdaplar da yer değiştirir. Deneyci, böyle bir sistemden hız sondaları, vs gibi veriler çıkarmak için çeşitli yöntemler seçebilir; fakat daha da basit bir şeyi denemekte fayda vardır: Engelden aşağıya doğru akış istikametinde bir noktayı doğrudan doğruya seçin ve muntazam aralıklarla girdabın sağda mı yoksa solda mı olduğunu araştırın.

Girdaplar statik durumda ise veri akımı şunun gibi olacaktır: sol-sol-sol-sol-sol-sol-sol-sol-sol-sol-sol-sol-sol-sol-sol-sol-sol-sol-sol-sol-sol-sol-sol-sol-sol-sol-sol-. Gözlemci, bir süre sonra, yeni veri bitlerinin sistem hakkında yeni enformasyon veremez hale geldiğini hissetmeye başlar.

Ya da girdaplar periyodik olarak ileri, geri hareket etmektedir: sol-sağ-sol-sağ-sol-sağ-sol-sağ-sol-sağ-sol-sağ-sol-sağ-sol-sağ-sol-sağ-sol-sağ-. Bunda da aynı şekilde, sistem ilk başta bir derece daha ilginç görünmesine rağmen, kısa zaman sonra artık dağarcığında hiçbir sürpriz kalmaz.

Bununla birlikte, sistem, öngörülemezliği nedeniyle kaotik hale geldikçe, düzgün bir enformasyon akımı üretmeye başlar. Her yeni gözlem yeni bir bite tekabül eder. Bu da sistemin bütününün karakterini anlamaya çalışan deneyciye sorun yaratır. Shaw'un dediği gibi, "Odadan hiç ayrılamıyordu. Akış devamlı bir enformasyon kaynağı idi."

Bu enformasyon nereden gelmektedir? Mikro ölçeklerin ısı banyosundan, milyarlarca molekülün gelişigüzel termodinamik danslarından. Tıpkı türbülansın enerjiyi, vorteks zincirleri vasıtasıyla, büyük ölçeklerden aşağıya, viskozitenin sönümlü küçük ölçeklerine iletmesi gibi, enformasyon da küçük ölçeklerden geriye, yani büyük ölçeklere doğru iletilmektedir - daha doğrusu, Shaw ile arkadaşlarının betimlemesi bu şekildeydi. Enformasyonu yukarı doğru ileten kanal da garip çekicidir; garip çekici başlangıçtaki geleşigüzelliği büyütmekte ve böylece Kelebek Etkisinin bazı küçük belirsizlikleri büyük meteorolojik olaylar ölçeğinde büyütmesine benzemektedir.

Şimdi soru ne kadar büyüttüğü şeklindeydi? Shaw, yaptıkları çalışmaların tekerrürden ibaret olduğunu gene bilmeden

- Sovyet bilim adamlarının da bu konuda başı çektiğini buldu. A. N. Kolmogorov ve Yasha Sinai,[20] bir sistemdeki "birim zaman başına entropi"nin faz uzayında gerilen ve katlanan yüzeylerin geometrik resimlerine tatbik edilme biçimi üzerinde üzerinde çalışmış ve bunun matematiksel bir açıklamasını yapmaya muvaffak olmuşlardı. Bu yöntemin özünde kavramsal düzeyde, bazı başlangıç şartları dizilerinin çevresine özensizce öylesine küçük bir kutu çizmek, (bir topun üzerine küçük bir kare çizer gibi) sonra da çeşitli genişleme veya bükülmelerin kutu üzerindeki etkisini ölçmek vardı. Mesela bir yönde gerilip uzarken diğer yönünde genişlemeyip dar olarak kalabiliyordu. Kutunun alanındaki değişme, geçmişte sistemin içine, bir enformasyon kazancı ya da kaybı şeklinde bir belirsizlik girmiş olduğuna delalet ediyordu.

Enformasyon, öngörülemezlik yerine kullanılan gösterişli bir kelime olduğu ölçüde, bu anlayış sırf Ruelle gibi bilim adamlarının geliştirmekte oldukları fikirlere uygun düşmekteydi. Buna karşılık Santa Cruzlu grup, iletişim teoricileri tarafından epeyi zamandan beri üzerinde araştırmalar yapılan matematiksel bir mantık sistemini enformasyon teorisi sayesinde benimseyebildi. Mesela, aslında determinist olan bir sisteme dışardan gürültü ilave etme problemi, dinamik alanı bakımından yeni olmasına karşın iletişim alanındakilerin yakından bildikleri bir sorundu. Bununla birlikte, teorinin bu genç bilim adamlarını esas cezbeden yönleri arasında matematiğin ancak kısmi bir yeri vardı. Enformasyon üreten sistemler dedikleri zaman, dünyada kendiliğinden meydana gelen şekillerin üretilmesini kastediyorlardı. Packard, "Komplike dinamiğin doruğunda biyolojik evrimin prosesleri ya da düşüncenin prosesleri bulunur. Bu son derece komplike sistemlerin enformasyon ürettikleri yolunda bir anlayış bulunduğunu ancak sağduyu ile sezebilirsiniz. Milyarlarca yıl önce sadece protoplazma damlaları vardı; şimdi milyarlarca yıl sonra biz gene oradayız. Demek ki enformasyon yaratılmış ve yapımızın içine depolanmıştır. Bir insanın aklı çocukluktan başlayarak gelişirken, açıkça görülür ki, enformasyon sadece biriktirilmeyip aynı zamanda üretil-

mektedir de - yani, daha önce orada bulunmayan bağlantılar sayesinde yaratılmaktadır."[21] Oysa bunun gibi sözler, aklı başında bir fizikçiyi zıvanadan çıkarmaya yeterdi.

Başlangıçta on parmağında on marifet olan bu gençlerin daha sonra filozoflaştığını görüyoruz. Acaba, bu kadar iyi bildikleri garip çekicilerle klasik fizik deneyleri arasında bir köprü kurabilirler miydi? Şimdi, sağ-sol-sağ-sağ-sol-sağ-sol-sol-sol-sağ'ın öngörülemez ve enformasyon üreten bir fenomen olduğunu söylemek başka şeydi. Gerçek bir veri akımını alıp bunun Lyapunov üslü sayısını, entropisini, boyutunu ölçmek ise bambaşka bir şeydi. Gene de, Santa Cruzlu fizikçiler bu fikirleri, kendilerinden daha yaşlı olan meslektaşlarına göre daha kolaylıkla evirip çevirebiliyorlardı. Garip çekicilerle gece gündüz demeden birlikte yaşaya yaşaya, onları günlük hayatlarının her anında karşılaştıkları çarpıntı, çalkantı, tepinme, sallanma gibi geçitli fenomenlerde görüp tanıdıklarına kendi kendilerini inandırmışlardı.

Bir kahvede oturup oynadıkları bir oyun vardı. Ortaya şöyle bir soru atarlardı: En yakınımızdaki garip çekici ne kadar mesafede? Şu otomobilin takırdayan tamponu mu? Düzgünce esen meltemle o yana bu yana dalgalanan oradaki bayrak mı? Titreşen bir yaprak mı? adeta Thomas S. Kuhn'a bir yankı olarak, Shaw, "Bir şeyi algılamanızı sağlayacak olan doğru görüntüyü almadıkça o şeyi görmeniz mümkün değildir,"[22] diyordu. Çok geçmemişti ki, Bill Burke adlı relativiteci arkadaşları arabasındaki kilometre saatinin bir garip çekicinin nonlineer tarzda yaptığı gibi tıkırdadığına tamamen inanmıştı. Shaw'un da, sonraki birkaç yılda elini meşgul edecek bir deney projesine takılarak kendisine seçtiği konu, ev içinde hiçbir fizikçinin aklına gelmeyecek kadar basit bir dinamik sistemdi: Damlayan bir musluk. Çoğu kimse su damlatan klasik bir musluk modelinde suyun şaşmaz bir periyodiklikle damladığını zanneder; aslında hiç de öyle değildir, böyle olmadığı yapılacak kısacık bir deneyle de sabittir. Shaw, "Öngörülebilen davranıştan öngörülemeyen davranışa geçen sistemlerin basit bir örneğidir,"[23] diyordu. "Musluğu birazcık daha açarsanız suyun şırıl şırıl düzensiz-

ce aktığı bir rejimle karşılaşırsınız. Bu sürecin uzun bir süre içinde öngörülmesinin imkânsızlığı ortaya çıkar. Demek ki, musluk kadar basit bir şey bile yaratıcılığını ebediyete kadar sürdüren bir süreç üretebilmektedir."

Organizasyon üreten bir sistem olarak damlayan bir muslukla yapılacak fazla bir şey yoktur. Sadece damlayış üretmektedir; her damla da aşağı yukarı bir önceki kadardır. Ne var ki, kaos araştırmalarına ilk olarak atılan bir kimse bakımından, damlayan musluk örneğinin birtakım avantajları olduğu görülüyordu. Bir kere, herkesin zihninde bunun bir resmi vardır. Veri akımı olabildiğince tek boyutludur: Zaman içinde ölçülen tek tek noktaların ritmik bir vuruşla birbirini izlemesi. Bu niteliklerin hiçbiri Santa Cruzlu grubun daha sonra ele aldığı sistemlerde[24] bulunmuyordu - mesela, insanın bağışıklık sistemi veya kuzeydeki Stanford Linear Accelerator Center'de (Stanford Lineer Hızlandırıcı Merkezi) çarpışan parçacık demetlerinin performansını düşüren ve bir türlü izahı bulunamayan baş belası demetler etkisi gibi sorunlarda yoktu. Libschaber ve Swinney gibi deneysel fizikçiler biraz daha karmaşık bir sistemdeki bir noktaya rasgele bir sonda yerleştirerek tek boyutlu bir veri akımı elde etmişlerdi. Damlayan musluğun tek özelliği, tek bir veri hattı bulunmasıdır. Hatta hız ve sıcaklık bakımından da devamlı bir değişikliğe maruz kalmaz; sadece bir damlama anları listesinden ibarettir.

Böyle bir sistemi karşısına alması istenen klasik bir fizikçi işe, elinden geldiğince tam bir fiziksel model meydana getirmekle başlayacaktır. Damlanın yaratılışını ve musluktan kopuşunu yöneten prosesler göründükleri kadar basit olmamakla birlikte bunları anlamak mümkündür. Önemli değişkenlerden biri akış hızıdır.[25] (Hidrodinamik sistemlerin birçoğuyla mukayese edildiğinde bu hız yavaş olacaktır. Shaw genellikle saniyede 1 ila 10 arasındaki damlama hızlarına bakmıştır; bu da, on beş günde 120 ila 1200 litre arasındaki bir akış hızı demektir.) Diğer değişkenler akışkanın viskozitesini ve yüzeysel gerilimi içerir. Musluktan sarkan bir su damlası, kopmayı beklerken, üç boyutlu komplike bir şekil

alır; sırf bu şeklin hesaplanması da, Shaw'un dediği gibi, "bilgisayar tarafından yapılmış bir hesap şaheseridir."[26] Üstelik, bu şekil statik bir şekil de değildir. İçi suyla dolan bir damla yüzeysel gerilimli bir lastik balona benzer; bir o tarafa, bir bu tarafa salınırken kütlesi büyür; cidarları gerilir ve bu şekilde ulaştığı kritik noktayı geçer geçmez kopar. Damlama problemini tümüyle modellemek isteyen bir fizikçinin önce, ikili nonlineer diferansiyel denklem dizilerini duruma uygun olan sınır şartlarıyla birlikte yazması, sonra da bu problemleri çözmeye kalkışması gerekecektir ki, bu fizikçinin kısa zamanda çözülmesi imkânsız bir hesap labirenti içine düşmemesi mümkün değildir.

Bunun alternatif bir yaklaşımı fiziği tamamen unutup sanki kara bir kutunun içinden çıkıyormuş gibi sadece verilere bakmaktır. Damlalar arasındaki zaman aralıklarını gösteren bir sayı listesini inceleyen bir kaos dinamiği uzmanı buradan faydalı bir şeyler çıkarabilir mi? Gerçekten de, bu tür verileri tertiplemek ve sonra tekrar fiziğe geri dönmek için yöntemler tasarlanabileceği ortaya çıkmıştır; bu yöntemler de, kaosun gerçek dünyaya ilişkin problemlere uygulanabilmesi bakımdan çok büyük önem taşımaktadır.

Shaw bu iki aşırı uç arasında, ortalarda bir yerden başladı ve tam bir fiziksel modelin bir nevi karikatürünü gerçekleştirdi. Damla şekillerini bilmediği, üç boyutlu karmaşık hareketleri bilmediği için, damlama fiziğini ana hatlarıyla özetledi. Bir yaya asılı vaziyette duran bir ağırlığı tahayyül etti. Bu ağırlığın zaman geçtikçe düzgün bir şekilde arttığını tahayyül etti. Ağırlık artarken, yay geriliyor ve ağırlık gittikçe daha aşağıya sarkıyordu. Belirli bir noktaya eriştiğinde, ağırlığın bir parçası kopacaktı. Shaw'un öylesine yaptığı varsayım uyarınca, kopup ayrılan miktar, tamamen aşağı inen ağırlığın kopma noktasına eriştiği andaki hızına bağlı olacaktı.

Tabii, bundan sonra, kalan ağırlık, yayların yaptığı gibi, tekrar geri zıplayacak ve doktora öğrencilerinin standart denklemler kullanarak modellemeyi öğrendiği cinsten salınımlar yapacaktı. Modelin ilginç özelliği - tek ilginç özelliği ve kaotik davranışı mümkün kılan nonlineer bükülme - bir son-

raki damlanın, yayın esnekliği ile düzenli bir şekilde artan ağırlığın birbirlerini nasıl etkilediklerine bağlı oluşuydu. Ağırlık, bu zıplama sırasında aşağı inerken kopma noktasına çok daha çabuk erişebilmekte, yukarı çıkarken de bu süreç biraz gecikebilmektedir. Gerçek bir muslukta, damlaların hepsi aynı boyda değildir. Damlanın boyu hem akışın hızına hem de zıplamanın yönüne bağlıdır. Bir damla aşağı iniş hareketi sırasında oluşmaya başlamışsa daha çabuk kopacaktır. Yukarı zıplama sırasında oluşuyorsa kopmadan önce içine az bir miktar daha su doldurabilecektir. Shaw'un modeli tamamen üç diferansiyel denklemde özetlenebilecek kadar basitti; Poincaré ve Lorenz'in de gösterdiği gibi kaos için asgari olarak ne gerekiyorsa o kadarını içeriyordu. Ancak, gerçek bir musluk kadar karmaşıklık üretmesi mümkün müydü? Ayrıca, bu karmaşıklık aynı türden bir karmaşıklık mı olacaktı ?

Böylece Shaw kendini fizik bölümündeki bir laboratuvarda, başının üstünde büyükçe bir plastik bidon, bidondan aşağıya uzanan bir hortumun ucunda en kaliteli bir nalburiye mağazasından alınmış sarı bir muslukla öylece oturur buldu. Her damla düştükçe, bir ışık huzmesini kesiyor; yan odadaki bir mikro bilgisayar da zamanı kaydediyordu. Bu arada, Shaw da üç ihtiyari denklemini hazır ederek analog bilgisayara yüklemiş ve hayali bir veri akımı üretmeye başlamıştı. Bir gün fakülte için bir uygulamalı konuşma hazırladı - bu Crutchfield'in deyişiyle "seminerimsi"[27] bir konuşma olacaktı, çünkü doktora öğrencilerinin resmen seminer verme yetkisi yoktu. Shaw teypte, bir musluktan bir teneke parçası üzerine düşen damlaların sesini dinletti. Bir de bilgisayarını çalıştırıp klik-klik-klik sesleriyle kesin bir senkopla tanımladığı birtakım kalıpları açıkladı. Problemi aynı anda hem önden hem de arkadan çözümlemişti; dinleyiciler düzensiz görünümlü bu sistemin içindeki yapının derinliğini duyabiliyorlardı. Ancak, grubun bu çalışmaları daha da ileri götürebilmesi için bütün deneylerdeki işlenmemiş verileri almanın ve bunlardan yola çıkarak kaosun özelliklerini ortaya koyan denklemlere ve garip çekicilere ulaşmanın bir usulünü bulması gerekiyordu.

Daha komplike bir sistem kullanmak suretiyle, bir değişkenin yerini başka bir değişkenin fonksiyonu olarak belirleyerek sıcaklık ve hızdaki değişmeleri zamanın geçişiyle ilişkilendirmek de düşünülebilirdi. Ne var ki damlayan musluk ancak bir zaman dizisi sağlıyordu. Bundan ötürü, Shaw öyle bir tekniği denedi ki, belki de Santa Cruzlu grubun kaosun gelişimi bakımından pratikteki en akıllı ve en kalıcı katkısı bu olmuştur. Bu yöntem, görünmeyen bir garip çekici için bir faz uzayını yeniden inşa etmeyi sağlayan bir yöntemdi ve hangi veri dizisi olursa olsun hepsine uygulanabiliyordu. Shaw, damlayan musluk verileri için iki boyutlu bir grafik düzenledi; bunda x ekseni düşen iki damla arasındaki bir zaman aralığını, y ekseni de bir sonraki zaman aralığını gösteriyordu. Birinci damla ile ikinci damla arasında 150 milisaniye geçmiş, sonra da ikinci damla ile üçüncü damla arasında 150 milisaniye geçmişse 150-150 koordinatlarındaki bir noktayı işaretliyordu.

Aslında hepsi bu kadardı. Suyun damlayışı düzenli olsaydı, yani suyun yavaş aktığı ve sistemin kendi "su saati rejimi"nde çalıştığı zamanda gösterdiği eğilimindeki gibi olsaydı, grafik epeyi sıkıcı bir şekil alırdı. Üzerindeki her nokta aynı yere düşerdi. Bütün grafik tek bir benekten ibaret olurdu. Ya da ona benzer bir şey olurdu. Aslında, bilgisayar modelindeki damlayan musluk ile gerçekte damlayan bir musluk arasındaki ilk fark, gerçekteki musluğun gürültüye maruz kalması ve aşırı derecede hassas olmasıydı. Shaw alaycı bir ses tonuyla, "Bizim alet neredeyse sismometre oldu çıktı,"[28] diyordu, "gürültüyü küçük düzey ölçeklerden büyük düzey ölçeklere yükseltmekte bire bir." Shaw, sonunda çalışmalarının büyük bölümünü gece, fizik koridorundan el ayak çekildikten sonra tamamlamak zorunda kaldı. Gürültü olduğu takdirde, teorinin öngördüğü tek bir benek yerine, belirli belirsiz peltemsi bir damladan başka bir şey göremeyecekti.

Akışın hızı arttıkça bu sistem periyodun katlandığı bir dallanmaya doğru yol alıyordu. Damlalar çifter çifter düşmeye başlıyordu. Bir zaman aralığı 150 milisaniye iken, bir sonraki 80 olabiliyordu. Böylece, grafikte de belirli belirsiz

iki peltemsi damla görülüyordu; bunlardan biri 150-80, diğeri ise 80-150 pozisyonundaydı. Esas sınama, bu kalıbın kaotik bir hal aldığı zaman ortaya çıktı. Bu süreç gerçekten gelişigüzel olsa, noktalar grafiğin her tarafına dağılmış vaziyette görünecekti. Bir zaman aralığı ile bir sonraki arasında hiçbir ilişki kurmak mümkün görülmeyecekti. Ne var ki, verilerin içinde gizlenmiş vaziyette duran bir garip çekici varsa belirli belirsiz bu beneklerin bir araya gelip birleşmesi sonucunda ortaya çıkan algılanabilen yapılar halinde kendini gösterecekti.

Bu yapıyı görebilmek için çoğu zaman üç boyut gerekliydi, ama asıl sorun bu değildi. Grafiği daha fazla boyutlu yapabilecek şekilde tekniği kolayca genelleştirmek mümkündü. Böylece, *n.* aralığın uzunluğu ile *n+1.* aralığının uzunluğundan oluşan sayı ikilisini düzlemde bir nokta ile temsil etmek yerine, *n.* aralığın uzunluğu, *n+1.* aralığınuzunluğu ve *n+2.* aralığın uzunluğundan oluşan sayı üçlüsü, üç boyutlu uzayda bir nokta ile temsil edilebilirdi. Aslında bu bir hile, bir aldatmacaydı. Normal olarak üç boyutlu bir grafik için bir sistemdeki üç bağımsız değişkenin bilinmesine ihtiyaç vardı. Oysa bu hile ile, bir değişken fiyatına üç değişken alınmış oluyordu. Bu hile, düzenin, gözle görülen düzensizlik içinde derinlerde bir yerde gömülü vaziyette bulunduğu yolunda bu bilim adamlarındaki inancı öylesine yansıtıyordu ki, gizli durumdaki bu düzen, hangi değişkenleri ölçmeleri gerektiğine karar veremeyen ya da bu tür değişkenleri doğrudan doğruya ölçmeyi beceremeyen deneysel fizikçilere bile kendini göstermenin bir yolunu bulabilecekti. Farmer'ın dediği gibi, "Bir değişkeni ele aldığınızda, bu değişkenin evrimi, onun etkileşim halinde bulunduğu diğer değişkenler tarafından muhakkak etkilenecektir. Diğer değişkenlerin değerleri sizin değişkenin tarihi içindeki bir yerlerde sıkışmış halde bulunmak zorundadır. En azından izleri orada bulunmak zorundadır."[29] Shaw'un damlayan musluğu konusunda, resimler bu görüşü açıkça ortaya koyuyordu. Özellikle, üç boyutta, gökte yazı yazarken kontroldan çıkmış bulunan bir uçağın ardında dumandan sarmallaşan bir iz bırakmasını andıran

şekiller beliriyordu. Shaw, deneyden elde ettiği verilerle adreslediği noktaları analog bilgisayarındaki modelden elde ettiği verilerle adreslediği noktalarla üst üste getirmeye muvaffak olmuşsa da asıl fark gerçek verilerin daima daha belli belirsiz ve gürültüyle kirlenmiş olmasıydı. Böyle olduğu zaman bile, yapıyı tanımamak mümkün değildi. Santa Cruzlu gençler Austin'deki Texas Üniversitesine nakletmiş bulunan Harry Swinney gibi tecrübeli deneysel fizikçilerle işbirliği yapmaya başladılar; her cins sistemden garip çekicilerin nasıl çıkarılabileceğini de öğrendiler. Bütün iş verileri yeterli büyüklükteki bir faz uzayı içine kapatabilmekti. David Ruelle ile birlikte garip çekicileri icat etmiş bulunan Floris Takens, kısa bir süre sonra gerçek bir veri akımından yola çıkarak bir çekicinin faz uzayını yeniden inşa etmek[30] için gerekli olan bu güçlü yöntemin matematiksel temelini kendi başına bulup gösterdi. Birçok araştırıcının kısa zamanda keşfettiği gibi, bu yöntem gürültüyü kaostan ayırt etmektedir; yeni anlamıyla kaos, basit süreçlerin yarattığı düzenli düzensizliktir. Gerçekten gelişigüzel olan veriler tanımlanması mümkün olmayan bir karmaşa halinde yayılmış durumda kalmaktadır. Buna karşılık kaos, - determinist ve paternli - verileri görülebilen şekillerin içine doğru çekmektedir. Düzensizliğe götürmesi mümkün olan bütün yolların arasından, doğa ancak birkaçını tercih etmektedir.

Asi gençlikten fizikçiliğe terfi süreci yavaş olmuştu. Arada sırada, bu öğrencilerden biri, bir kahvede otururken ya da laboratuvarda çalışırken gruptakilerin bilim heveslerinin hâlâ sona ermediğine şaşıran kimselerle münakaşaya tutuşurdu. Jim Crutchfield, "Yahu, biz bunu hâlâ yapıyoruz,[31] hâlâ da yaptığımız doğru çıkıyor. Bizim bir yere gideceğimiz yok. İnceldiği yerden kopar," diyordu.

Fakültedeki en büyük destekçileri, matematik bölümünden Smale'in çıraklığını yapmış olan Ralph Abraham, fizik bölümünden de Bill Burke idi; Burke, kendini "Analog Bilgisayar Çarı" ilan ederek, hiç olmazsa Kulübün bu cihazı sahiplenmesine arka çıkmıştı. Fizik fakültesinin geri kalan kısmı daha zor bir duruma düştü. Birkaç yıl sonra, profesör-

lerden bazıları Kulübün bölümden ilgisizlik veya muhalefet gördüğü ve bunun üstesinden gelmek zorunda kaldığı yolundaki iddiaları şiddetle reddettiler.[32] Kulüp de, kaosa son dakikada iltihak edenlerce anlatılan hikâyeleri uydurma tarih diye tanımlayıp aynı şekilde şiddetle tepki gösterdi. Shaw, "Bizim hiç danışmanımız olmadı, bize ne yapacağımızı söyleyen hiç kimse yoktu,"[33] dedi. "Bizi yıllarca muhasım gibi gördüler, bugün de aynı şey devam ediyor. Biz Santa Cruz'da hiçbir zaman para desteği görmedik. Her birimiz bir kuruş almadan uzun zaman çalışmışızdır; bütün çalışmamızı kıt kanaat geçinerek yürüttük; bu faaliyetimizde ne fikri ne de başka yönden bize yol gösteren hiçbir kimse olmadı."

Fakülte yönetimi ise bilimsel bir temele dayanıp dayanmadığı pek belli olmayan bir konuda, uzun süre boyunca araştırma yapılmasına göz yumulduğu hatta teşvik bile edildiği düşüncesindeydi. Shaw'un süper iletkenlik tezinin danışmanı, Shaw düşük sıcaklık fiziğinden koptuktan çok sonraları bile, bir yıl kadar daha aylıklarını ödemeye devam etmişti. Kimse çıkıp kaos araştırmalarına son verilmesini söylememişti. Fakülte yönetiminin yaptığı şey, en fazla, bu gençleri zorlamaksızın caydırmaya çalışmaktan ibaretti. Kulüp üyelerinin her biri, zaman zaman bir kenara çekilmiş; samimi bir şekilde içini açmasına fırsat verilmişti. Hatta bu öğrencilerin yaptıkları çalışma sonuçlarının, bir yolu bulunup doktora olarak kabul edilmesi sağlansa bile, mevcut olmayan bir bilim dalında iş bulmalarına hiç kimsenin yardımcı olamayacağı yolunda her biri defalarca ikaz edilmişti. Fakülte, "Hadi, şimdilik bunu günün bir modası olarak düşünelim, peki moda geçtikten sonra ne yapacaksınız ki?" diyordu. Oysa, Santa Cruz tepelerini kaplayan sekoya ormanının dışına çıktığınız anda, kaosun kendi bilim düzenini yaratmakta olduğunu görüyordunuz; Dinamik Sistemler Kulübünün de bu düzene dahil olmaktan başka çaresi yoktu.

Mitchell Feigenbaum, evrensellik konusundaki buluşunu açıklamak üzere bir konferans turu yaptığı sırada, bir yıl Santa Cruz'a geldi. Her zamanki gibi, konuşması anlaşılması zor bir matematiksel açıklamaya dayanıyordu; renor-

malizasyon grup teorisi, yoğunlaştırılmış madde fiziği olarak sadece uzmanlara hitap eden ve bu öğrencilerin okumadığı bir konuydu. Kaldı ki, Kulüp tek boyutlu uygulamalardan ziyade gerçek sistemlere daha fazla ilgi duyuyordu.[34] Bu arada Doyne Farmer, Berkeley'de Oscar E. Lanford III adlı bir matematikçinin kaosu araştırdığını duymuş ve onunla görüşmeye gitmişti. Lanford Farmer'ı gayet kibar bir şekilde dinledikten sonra çalışmalarında hiçbir benzerlik olmadığını söyledi.[35] Kendisi de Feigenbaum'u anlamaya çalışmaktaydı.

Olacak şey değil. İnsan nasıl bu kadar dar görüşlü olabilir? Farmer'ın aklından bunlar geçiyordu. "Bu küçük yörüngelere bakıyordu. Oysa biz bu arada enformasyon teorisinin derinliklerine dalmış, içinden kaosu çekip ayırmış, neyin tık edip kaosu başlattığını görmeye, daha fazla istatistik ölçümler yapabilmek için metrik entropiyle Lyapunov üslü sayısı arasında ilişki kurmaya gayret ediyorduk."

Farmer'la yaptığı sohbet sırasında, Lanford evrensellik üzerinde fazla durmadı; Farmer da bu noktayı gözden kaçırdığını çok daha sonra anlayabildi. Farmer, "Benim saflığıma geldi,"[36] dedi. "Evrensellik fikrini sadece büyük bir sonuç olarak görmemeliydik. Mitchell'in buluşu aynı zamanda, bir ordu işsiz kalmış kritik fenomenler araştırıcılarına iş çıkarmaya yetecek bir teknik sayılırdı.

"Bu noktaya kadar, nonlineer sistemlere her durum için ayrı bir yol bulup öyle işlem yapmak gerektiği görülüyordu. Biz bu yolu sayısallaştırmak ve betimlemek amacıyla bir dil bulmaya çalışıyorduk, fakat bize hâlâ her durumu ayrı ayrı değerlendirmemiz gerekir gibi geliyordu. Sistemleri sınıflara nasıl ayıracağımızı ve lineer sistemlerde olduğu gibi, bu sınıfın tamamı için geçerli olan çözümleri nasıl yazacağımızı bilemiyorduk. Evrensellik demek, bu sınıfın içinde ne varsa hepsi için geçerli ve sayısal olarak birbirinin tamamen aynı olan özellikleri bulup çıkartmak demekti. *Öngörülebilir* özellikleri. İşte önemi de buradan geliyordu.

"Bir de sosyolojik faktör vardı ki, bu da yangına körükle gidiyordu. Mitchell vardığı sonuçları renormalizasyon diliyle

formüle etti. Kritik fenomenlerle uğraşan araştırıcıların kullanmaya alışık oldukları bütün bu teknik ekipmanı aldı. Bu araştırıcıların büyük sıkıntısı vardı, çünkü onların uğraşabileceği hiçbir önemli sorun kalmamışa benziyordu. Etrafta, dağarcıklarındaki hokkabazlık numaralarını uygulayabilecekleri başka bir şeyler arayıp duruyorlardı. Feigenbaum birdenbire ortaya çıkıp bu hokkabazlıklar için fevkalade önemli bir uygulama alanı bulduğunu gösterdi. Bu da yepyeni bir bilim alt dalının doğmasına yol açtı."

Bununla birlikte, bizim Santa Cruzlu öğrenciler, bu gelişmelerden tamamen bağımsız olarak kendi çaplarında bir etki yaratmaya başladılar. 1978 yılında kışın ortalarında, Laguna Beach'te yapılan bir yoğun madde fiziği konferansında yaptıkları beklenmedik bir çıkıştan sonra Bölüm içinde yıldızları parlamaya başladı; bu konferansı Xerox Palo Alto Araştırma Merkezinden Bernardo Huberman ile Stanford Üniversitesi birlikte düzenlemişlerdi. Kulüp üyeleri davetli değildi, ama hepsi Shaw'un Krema Rüyası adını verdiği 1959 modeli Ford steyşın kamyonetine doluşup konferansa gittiler. Belki de gerekebilir diye yanlarına birtakım cihazlar almayı ihmal etmemişler, kamyonete dev bir televizyon monitörü ile bir de videoteyp atmışlardı. Programdaki konuşmacılardan biri son dakikada gelmekten vazgeçince, Huberman o konuşmacı yerine Shaw'u kürsüye davet etti. Zamanlama mükemmel olmuştu. Kaos artık resmi bir terim statüsü kazanmış bulunmasına rağmen, konferansa katılan fizikçiler arasında kaosun ne ifade ettiğini bilenlerin sayısı çok azdı. Böylece, Shaw konuşmasına, faz uzayındaki çekicileri izah ederek başladı: ilk önce sabit noktaları (buralarda her şey duruşa geçmektedir); sonra limit çevrimleri (burada her şey salınım halindedir); sonra da garip çekicileri (geri kalan her şeyi) anlattı. Bilgisayardan çıkardığı grafikleri videodan gösterdi. (Odyovizüel araçlar bize büyük puan kazandırdı,"[37] diyordu. "Yanıp sönen ışıklarla hepsinin aklını başından almayı başardık.") Lorenz çekicisini ve damlayan musluğu izah etti. Bunun geometrisini, yani şekillerin nasıl gerilip uzadığını ve katlandığını açıkladı ve bu geometrinin

enformasyon teorisinin büyük terimleri bakımından ne ifade ettiğini anlattı. İyi bir denge sağlamak için de, konuşmasının sonunu paradigma değişmelerine ilişkin birkaç sözle tamamladı. Shaw'un konuşması müthiş bir zafer oldu; dinleyicileri arasında bulunan Santa Cruz fakültesi öğretim üyelerinden birçoğu da kaosu ilk defa kendi meslektaşlarının ağzından dinlemiş oldular.

1979'da New York Bilimler Akademisi'nde yapılan ikinci kaos konferansına grubun bütün üyeleri bu kez resmen katılımcı sıfatıyla davet edildiler; artık kaos patlayan bir alan halindeydi. 1977'deki toplantı Lorenz'in toplantısıydı; buna sayısı birkaç düzineyi geçmeyen uzmanlar katılmıştı. Bu toplantı ise Feigenbaum'un toplantısıydı; yüzlerce bilim adamı geldi. İki yıl önce Shaw, katılımcıların kapılarının altından atmak için makalesini daktiloya çekmek üzere utana sıkıla makine aramışken, şimdi aynı yerde Dinamik Sistemler Kulübü adeta bir matbaa haline gelmişti; süratle makale üretiyor ve makalelerde daima ortak imza kullanıyorlardı.

Ancak Kulübün ilelebet devam etmesi imkânsızdı. Gerçek bilim dünyasıyla yüz yüze geldikçe grubun bağları da zayıflar olmuştu. Bir gün Bernardo Huberman aradı.[38] Rob Shaw'la konuşmak istedi, fakat tesadüfen telefona Crutchfield çıktı. Huberman'ın kaos hakkında kesin ve basit bir makale yazmak için birlikte çalışabileceği birine ihtiyacı vardı. Kulübün yaşı en küçük üyesi olarak hep "bızdık" muamelesi görmekten bıkmış olan Crutchfield, Santa Cruz Fakültesinin bir hususta her zaman haklı çıktığının bilincine şimdi varıyordu: Her öğrenci günün birinde bireysel olarak kendi başına gerçekleştirdiği eseriyle değerlendirilecekti. Üstelik Huberman, fizik mesleği bakımından bir öğrencide bulunması mümkün olmayacak kadar engin bir tecrübeye sahipti; özellikle de belirli bir araştırma çalışmasının en ileri noktasına kadar nasıl götürülebileceğini biliyordu. Kulübün laboratuvarını görünce birtakım tereddütleri olmuştu: "Bütün bunlar bana epeyi flu görünüyor, bilirsiniz ya, divanlar, çuvaldan yapılmış puflar, sanki zaman makinesine girip, tekrar 1960'lı yıllara, çiçek çocuklara dönmüşüz gibi."[39] Huber-

man'a bir analog bilgisayar lazımdı; gerçekte araştırma projesini birkaç saatte yaptırmayı başardı. Ancak, Kulüple arasında bir sorun çıktı. Bir an geldi, Crutchfield, "Bütün arkadaşlar katılmak istiyor," dedi; Huberman da buna "kesinlikle olmaz" cevabını verdi. "bahis konusu olan işin itibarı değil, kabahatin kime ait olacağıdır. Diyelim ki makale yanlış çıktı - Kabahati bir kulübe mi bulacaksınız? Ben bir *kulübün* üyesi değilim ki." Huberman, titiz bir iş için kendine bir ortak arıyordu.

Sonuçta Huberman umduğunu elde etti: Fizikteki son buluş ve atılımları bildiren en itibarlı dergi olarak *Physical Review Letters*'de kaos hakkında yayınlanan ilk makale[40] bu oldu. Gerçekleştirilen şey, bilim politikası bakımından pek entipüften bir iş sayılmazdı. Crutchfield, "Bize göre, bunlar epeyi açık ve seçik olan şeylerdi," dedi. "Bernardo ise bunun çok muazzam bir etki yapacağını fark etmişti." Böylece grubun gerçek dünya ile kaynaşmasının ilk aşamalarından biri de gerçekleşmiş oluyordu. Crutchfield'in kulüpteki birlik ve beraberlik ruhuna ihanet ettiğini gören Farmer küplere binmişti.[41]

Kulüpten kopup ayrılan tek kişi Crutchfield değildi. Bizzat Farmer, hatta Packard da Huberman, Swinney, Yorke gibi tanınmış fizikçi ve matematikçilerle birlikte çalışmaya başlamışlardı. Santa Cruz potasında oluşturulan fikirler modern dinamik sistemler araştırmaları için sağlam bir çerçeve teşkil etti. Elindeki veri kütlesinin boyutunu ya da entropisini araştırmak isteyen bir fizikçinin bu amaçla kullanacağı en uygun tanımlar ve araştırma yöntemleri, belki de bir zamanlar Systron-Donner analog bilgisayarına fişlerin sokulup çıkartıldığı ve osiloskopa bakıldığı yıllarda yaratılmış bulunan tanım ve yöntemlerden başkası değildi. İklim uzmanları,[42] tıpkı klasik dinamikçilerin varsayımlarındaki gibi, atmosferdeki ve okyanuslardaki kaosun boyutlarının sonsuz mu olduğunu yoksa bir şekilde, alçak boyutlu bir garip çekicinin peşinden mi gittiğini tartışıyorlardı. Borsa verilerini analiz eden ekonomistler 3.7 ya da 5.3 boyutundaki çekicileri bulmaya çalışıyorlardı.[43] Boyut küçüldükçe sistem de

basitleşiyordu. Birçok matematiksel özelliği ayıklamak ve anlamak zarureti vardı. Fraktal boyut, Hausdorff boyutu, Lyapunov boyutu, enformasyon boyutu - kaotik bir sisteme ait bütün bu ölçülerin inceliklerini en iyi açıklamasını Farmer ve Yorke yaptı.[44] Bir çekicinin boyutu, o "çekicinin karakter özelliklerini tanımak için gerekli olan birinci derecedeki bilgi"[45] idi. Bu boyut, çekicinin öyle bir özelliğiydi ki, "bir noktanın çekici üzerindeki pozisyonunu belirli bir kesinlik çerçevesinde adresleyebilmek için gerekli olan enformasyon miktarı"nı sağlıyordu. Santa Cruzlu öğrencilerin ve birlikte çalıştıkları ağabeylerinin kullandığı yöntemler bu fikirleri diğer önemli sistem ölçülerine bağlamıştı: Bunlar, öngörülebilirliğin azalma hızı, enformasyonun akış hızı, karışım yaratma eğilimiydi. Bu yöntemlere başvuran bilim adamları zaman zaman verilerden grafik çıkarmak, küçük kutular çizmek ve her kutudaki veri noktalarını saymak durumunda kalmışlardır. Oysa, bu kadar ilkel görünmelerine rağmen, kaotik sistemlerin ilk kez olarak bilimsel bir çerçevede kavranmasını sağlayan da gene bu yöntemler olmuştur.

Bu arada, çırpınan bayraklarda ve takırdayan kilometre saatlerinde garip çekici aramayı öğrenen bilim adamları ellerinde bulunan bütün fizik literatüründeki determinist kaos emarelerini bulma gayretine düşmüşlerdir. İzahı bulunamayan gürültü, şaşırtan dalgalanmalar, düzensizlikle karışmış düzenlilik - bütün bu etkiler parça hızlandırıcılarından lazerlere, lazerlerden Josephson eklemlerine kadar her konuda araştırma yapan deneysel fizikçilerin makalelerinde birdenbire görülmeye başlıyordu. Kaos uzmanları bu emareleri kendileri bulmuş gibi yaparak, henüz kaosa dönmemiş kimselere, gerçekten de "sizin sorunlarınız bizim sorunumuzdur," diyerek yanaşıyorlardı. Mesela, şöyle başlayan makaleler görülüyordu: "Josephson eklemi salınıcıları üzerinde yapılan birçok deneyde çarpıcı bir gürültü yükselişi şeklinde bir olgu ile karşılaşılmıştır; bu olguyu termal dalgalanma ile açıklamak mümkün değildir."

Kulübün dağıldığı günlerde, Santa Cruz Fakültesinde de kaosa yönelmiş bazı öğretim üyeleri vardı. Buna karşılık, di-

ğer bazı fizikçiler de, geçmişte olanlara bakıp, diğer kampüslerde hızla ortaya çıkmaya başlayan nonlineer dinamik araştırmaları için Santa Cruz'un ilk baştan beri ulusal düzeyde bir araştırma merkezi olma fırsatını kaçırdığına üzüldüler. 1980'li yılların başlarında, Kulübün üyeleri mezun oldu ve her biri bir tarafa gitti. Shaw tezini 1980'de, Farmer 1981'de, Packard 1982'de bitirdi. Crutchfield'in 1983'te ortaya çıkan tezi, daha önce fizik ve matematik dergilerinde yayınlanmış bulunan on bir kadar makaleden oluşmuş boşluklarla dolu daktiloyla yazılmış sayfalardan ibaret karman çorman bir çalışmaydı. Berkeley'deki Kaliforniya Üniversitesinde öğrenimine devam etti. Farmer Los Alamos'ta Teorik Çalışmalar Bölümüne girdi. Packard ve Shaw Princeton'daki Institute for Advanced Study'e (Yüksek Araştırmalar Enstitüsü) girdiler. Crutchfield video feedback sarmallarını inceledi. Farmer "yağ fraktalları" üzerinde çalışıp insan vücudunun bağışıklık sistemindeki karmaşık dinamiği modelledi. Packard uzaydaki kaosu ve kar tanelerinin oluşumunu araştırdı. Shaw'a gelince, dağılan grupta bu tür çalışmaları devam ettirmeye heves etmeyen bir tek o kaldı. Shaw'a itibarını sağlayan çalışmalarından geriye sadece iki makale kalmıştı, birincisi Shaw'a bir Paris seyahati kazandıran, diğeri de Santa Cruz'daki araştırmalarının tamamını özetleyen damlayan musluk hakkındaki makaleydi. Çoğu zaman, Shaw bilim hayatını terketmenin eşiğine kadar geldi. Arkadaşlarından birinin söylediği gibi, o da salınım halindeydi.

İçimizdeki Ritimler

Bilim açıklama gayreti içinde değildir, bir yorum getirme gayretine girdiğinde bile zorlanır, asıl yaptığı şey ortaya model koymaktır. Model denince, gözlenen olguyu betimleyen matematiksel bir inşa anlaşılır; bunun içine bazı yorumlayıcı ifadeler de ilave edilir. Böyle bir matematiksel inşanın doğrulanması ise sadece ve kesinlikle modelin çalışması hususundaki beklentilere bağlıdır.

JOHN VON NEUMANN

Bernardo Huberman başını kaldırıp karşısında oturan dinleyici topluluğuna baktığında teorik ve deneysel biyologlardan, sırfi matematikçilerden, fizikçi ve psikiyatrlardan oluşan bu dinleyicilerle kendisi arasında bir iletişim kopukluğu bulunduğunu hissetti.[1] 1986 yılında, olağandışı bir konferansta olağandışı bir konuşma yapmış ve konuşmasını henüz bitirmişti; biyoloji ve tıpta kaos konusunda yapılan bu ilk büyük konferansı New York Bilimler Akademisi, Ulusal Zihinsel Sağlık Enstitüsü ve Deniz Kuvvetleri Araştırmaları Bürosu birlikte düzenlemişlerdi. Washington'un banliyösünde, Ulusal Sağlık Enstitülerinin muazzam Masur konferans salonunda konuşan Huberman'ın karşısında, uzun zamandan beri kaosla uğraşıp uzmanlaşmış tanıdık birçok çehrenin yanı sıra tanımadığı birçok yüz de vardı. Bu tür konferanslarda konuşmaya alışık kimselerin kolayca fark edeceği gibi dinleyicilerde bir sabırsızlık hissediliyordu - konferansın son günüydü, üstelik öğle yemeği saatinden hemen önceki son konuşmacı kendisiydi.

Arjantin'den göç etmiş, titiz ve itinalı giyinen, siyah saçlı bir Kaliforniyalı olan Huberman, Santa Cruzlu çetenin üyeleriyle kurduğu işbirliği ilişkilerinden beri kaosa duyduğu ilgisini devam ettirmişti. Xerox Şirketi'nin Palo Alto Araştırma Merkezinde araştırmacı olarak çalışıyordu. Zaman zaman şirketin ilgi alanına girmeyen konulara daldığı da olurdu; işte bu yüzden, biyoloji konferansında henüz bitirdiği konuşmayı da bunlardan biriyle ilgili bir konudan seçmişti: şizofreni hastalarının gözlerindeki fırıldak gibi rasgele hareketler için bir model geliştirmişti.

Psikiyatrlar, şizofreniyi tanımlamak ve şizofreni hastalarını tasnif etmek için yıllar boyu uğraşıp didinmişlerdi; ancak, bu hastalığın tanımını yapmak da neredeyse şizofrenleri tedavi etmek kadar zordu. Hastalığın belirtilerinin büyük bir kısmı zihinde ve davranışlarda meydana çıkıyordu. Bununla birlikte, 1908'den beri bilim adamları hastalığın öyle bir fiziksel tezahürünü öğrenmişlerdi ki, bu sadece şizofrenlerde değil hastaların akrabalarında da çıkıyordu. Hastalar yavaşça sallanan bir sarkacı gözleriyle izlemeye çalıştığında, gözleri düzgün hareketi takip edemiyordu. Normalde, göz hakikaten çok akıllı bir enstrümandır. Sağlıklı bir insanın gözleri hareketli hedefler üzerine kilitlendiğinde bilincinde en ufak bir düşünce olmasına gerek yoktur; hareketli görüntüler retina tabakasının üzerindeki yerinde donmuş olarak kalır. Buna karşılık şizofrenlerin gözleri kesik kesik hareketlerle kısa aralıklar halinde sıçramalar yaparken izlediği hedefin bazen gerisine bazen ilerisine bakar ve bu ilgisiz hareketlerden oluşan devamlı bir sis perdesi yaratır. Bunun neden böyle olduğunu bilen kimse yoktur.

Fizyologlar yıllarca muazzam miktarlarda veri toplamış, tablolar ve grafikler yaparak gözün fırıldak hareketlerini göstermeye çalışmıştır. Bu dalgalanmaların genellikle gözün kaslarını kontrol eden merkezi sinir sisteminden gelen sinyallerdeki dalgalanmalardan kaynaklandığını varsayıyorlardı. Gürültülü çıktının varlığı girdinin de gürültülü olduğunu düşündürdüğünden, şizofrenlerin beynini etkileyen bazı gelişigüzel rahatsızlıklar belki de hastaların gözlerinde teza-

hür ediyordu. Huberman, fizikçi olarak başka bir varsayımdan hareketle mütevazi bir model geliştirdi.

Gözün mekaniğini mümkün olan en basit şekliyle düşündü ve buna ilişkin bir denklem yazdı. Bu denklemde sallanan sarkacın hem genliği için bir terim hem de frekansı için bir terim vardı. Gözün ataleti için bir terim vardı. Gözün nemlenmesi ya da sürtünme için bir terim vardı. Nihayet hataların düzeltilmesi, gözün hedefin üzerine kilitlenmesinin sağlanması için de terimler vardı.

Huberman'ın dinleyicilerine izah ettiği gibi, sonuçta ortaya çıkan denklemin analog bir mekanik sistemi betimlediği görülmektedir; bir top çukur bir oluğun içinde yuvarlanmakta, aynı anda da oluk bir yandan öbür yana sallanmaktadır. Bir yandan öbür yana hareket sarkacın hareketine tekabül etmektedir; oluğun cidarları da hatayı düzeltme özelliğine tekabül etmekte ve topu tekrar merkeze doğru itmek için gerilmektedir. Bu gibi denklemlerin araştırması bugün için artık normal bir işlem haline gelmişse de, Huberman modelini bilgisayarda saatlerce çalıştırmış, çeşitli parametreleri değiştirmiş ve sonuçta ortaya çıkan davranışları gösteren grafikler çizmişti. Bunun sonunda hem düzen hem de kaos buldu. Modelini çalıştırdığı bazı rejimlerde, göz düzgün bir izi takip edebiliyordu; o durumlarda, nonlineerlik derecesini arttırmaya başlayınca, sistem hızla periyodun ikiye katlanması sürecine giriyor ve tıp literatüründe bildirilen düzensizlikten ayırt edilemeyecek bir cins düzensizlik üretiyordu.

Bu rasgele fırıldak hareketi modelde, dışardan gelen herhangi bir sinyalle ilişkilendirilmiş değildi. Sistemin içinde bulunan aşırı derecedeki nonlineerliğin önlenmesi mümkün olmayan bir sonucundan ibaretti. Huberman'ı dinleyen bazı doktorlara göre, geliştirdiği bu model mantığa uygun bir genetik şizofreni modeliyle çok bağdaşır nitelikli görünüyordu. Bir nonlineerlik zayıf ya da kuvvetli oluşuna bağlı olarak bir sistemi istikrara kavuşturabiliyor ya da bozabiliyorsa bu nonlineerliğin tek bir genetik karakter özelliğine tekabül etmesi mümkündü. Bir psikiyatr bu kavramı gut hastalığının genetiğiyle mukayese etti; gutta da ürik asit düzeyinin çok

yükselmesi bazı patolojik semptomlar doğmasına neden oluyordu. Tıp literatürüne Huberman'dan daha fazla aşina olan başkaları, bu durumdakilerin sadece şizofrenler olmadığını belirttiler; nöroloji hastalıklarının çeşitli türlerinde hastalarda göz hareketiyle ilgili türlü türlü sorunlar bulunabileceğini söylediler. Bir kimse geriye dönüp kaos araçlarını uygulamayı göze alsa inceleyeceği verilerde muhakkak periyodik salınımlar, aperiyodik salınımlar gibi dinamiğe ilişkin her tür davranış biçimleri bulabilecekti.

Konferansı dinleyen bilim adamları arasında yeni bir araştırma alanının satır satır açıldığını gören kaç kişi varsa bir o kadar da, Huberman'ın kendi modelini biraz fazla kabaca basitleştirdiğini düşünen bilim adamı vardı. Sıra konuşmanın soru cevap bölümüne gelince, duydukları sıkıntı ve hoşnutsuzluğu dillerinin altından çıkardılar. Bu bilim adamlarından biri şöyle sordu: "Benim anlamadığım şey şu: Modelinizi yaparken siz kendinize neyi rehber alırsınız? Nonlineer dinamiğe özgü olan bu öğeleri, yani bu dallanmaları ve kaotik çözümleri neden arıyorsunuz?"

Huberman bir an durdu. "Tabii, dediğiniz doğrudur. Demek ki ben bu yaptıklarımın amacını anlatmakta başarılı olamamışım. Bu model gayet basittir. Birisi bana gelip, 'Biz bunu görüyoruz, size göre burada neler oluyor?' der. Ben de bakarım, 'Acaba sizce bunu nasıl izah etmek mümkündür?' derim. Buun üzerine, onlar da, 'Bizim bulabildiğimiz tek şey *kafanızın* içinde bu kadar kısa bir zamanda dalgalanan bir şeydir,' derler. Ben de, 'Öyleyse bakın, derim, benim işim kaosçuluktur; gözün izlemesiyle ilgili olarak sizin yazabileceğiniz en basit nonlineer modelde, *en basitinde*, bu jenerik özelliklerinin bulunduğunu, ayrıca bu şeylerin ayrıntılarının neye benzediğinin de hiçbir önemi olmadığını biliyorum. Böylece ben bu modeli kurarım ve insanlar da der ki, 'Vay canına, çok ilginç bir şey yaptınız, bunun belki de bu sistemin bünyesinin içindeki kaos olduğunu biz hiç düşünmemiştik.'

"Bu modelde benim savunma durumunda olabileceğim nörofizyolojik verilerden hiçbiri mevcut değildir. Söylediğim tek şey, gözün yaptığı *en basit* takip etme hareketinin, hata

yapma ve sıfır noktasına gitme eğiliminde olan bir şey olduğudur. Biz gözümüzü bu şekilde oynatabiliyoruz, bir radar anteni de bir uçağı bu şekilde takip ediyor. Bu modeli alıp her şeye uygulayabilirsiniz."

Salondaki dinleayiciler arasında bulunan bir diğer biyolog Huberman'ın modelinin aşırı derecede basit olmasından duyduğu rahatsızlıkla mikrofonu eline aldı. Gerçek gözlerde dört kas kontrol sisteminin aynı anda çalıştığına işaret etti. Kendince gerçekçi bir modellemenin nasıl olması gerektiği hakkında epeyi teknik düzeyde bir açıklama yapmaya başlayıp, mesela gözün aşırı derecede nemli olması dolayısıyla kütle teriminin nasıl dışarda bırakıldığını izah etti. "Bir komplikasyon daha vardır ki, o da mevcut olan kütle miktarı gözün dönüş hızına bağlıdır, çünkü göz çok hızlı olarak ivme kazandıkça kütlenin bir kısmı geri kalır. Gözün dış kabı çok hızla dönerken gözün içindeki jöle geri kalır."

Sessizlik. Huberman köşeye sıkışmıştı. Konferansın düzenleyenlerden biri olan Arnold Mandell adlı ve kaos konusuna çok yakın ilgi duyan bir psikiyatr mikrofonu Huberman'ın elinden aldı.

"Bakın dedi, ben ruh hekimi olarak bir yorum getirmek istiyorum. Biraz önce burada görmüş bulunduğunuz şey nedir bilir misiniz? Alçak boyutlu global sistemler üzerinde çalışan bir nonlineer dinamikçisi matematiksel araçlar kullanmakta olan bir biyologla gelip konuştuğu zaman ortaya böyle bir şey çıkar. Bütün sistemlerin aslında evrensel özelliklere sahip olduğu şeklindeki görüş, *en basit* açıklamalarla ortaya konduğunda hepimize ters gelmektedir. Bu yüzden, asıl sorumuz şudur: 'Şizofreninin alt tipi nedir?' 'Gözün dört motor sistemi vardır,' ve 'Şimdiki fiziksel yapı açısından modelleme nasıl olmalıdır,' ve işte böylece sorun çözülmeye başlar.

'Şimdiki durum şu ki, fizikçiler veya bilim adamları her şeyin tam 50.000 parçasını öğrenirken, biz gerçekte hareketin evrensel öğeleri bulunması ihtimaline karşı çıkıyoruz. Bernardo buraya bu ihtimallerden birini getirmişken şurada neler olduğuna bakın."

Huberman, "Beş yıl önce fizikte de aynı şey olmuştu," dedi, ama şimdi onlar da nihayet ikna oldular."

Tercih hiç değişmez. Modelinizi daha karmaşık ve gerçeğe daha sadık şekilde kurabilirsiniz ya da daha basit ve daha kolaylıkla işletilebilecek bir şekilde yapabilirsiniz. Mükemmel modelin gerçeği en mükemmel şekilde aksettiren model olduğuna ancak bilim adamlarının en safları inanır. Böyle bir modelin ne gibi sakıncaları olacağını bilmek istiyorsanız, bir şehri en iyi göstermek için o şehir kadar büyük ve ayrıntılı bir harita yaptığınızı düşünün; bu şehirdeki her parkı, her sokağı, her binayı, her ağacı, her direği, her kişiyi ve her haritayı resmeden bir haritayı gözünüzün önüne getirin. Böyle bir haritayı yapmak mümkün olsaydı mükemmelliği amacını aşmış olurdu; oysa haritanın amacı genelleştirmek ve soyutlamaktır. Haritacılar müşterilerinin tercih ettiği özellikleri vurgulayan haritalar yaparlar. Haritalar ve modeller, amaçları neyse ona göre, hem dünyaya benzemeye çalışmalı hem de onu sadeleştirmelidirler.

Santa Cruzlu matematikçi Ralph Abraham'a göre, iyi bir model, Gaia hipotezinin babası olan James E. Lovelock ve Lynn Margulis'in "papatya dünyası"dır; bu hipotezde hayat için gerekli olan koşullar gene hayatın kendisi tarafından, dinamik bir feedback süreci çerçevesinde yaratılmakta ve kendi kendilerini sürdürmektedir. Papatya dünyası, Gaia hipotezinin belki de aklın düşünebileceği en basit versiyonudur; o kadar basittir ki aptal bir fikir gibi görünmektedir. Abraham sorunu şöyle açıklar: "Üç şey olmaktadır: beyaz papatyalar, siyah papatyalar ve ekilmemiş çöl. Üç renk: beyaz, siyah ve kırmızı. Bütün bunlar bize gezenimiz hakkında ne öğretebilir? Sıcaklık regülasyonunun nasıl meydana geldiğini izah eder. Bu gezegenin yaşam için neden uygun bir sıcaklık derecesinde olduğunu izah eder. Papatya dünyası modeli korkunç bir modeldir, ne var ki, bize yeryüzünde biyolojik homeostazinin nasıl yaratıldığını öğretmektedir."[2]

Beyaz papatyalar ışığı yansıtarak gezegeni soğutur. Siyah papatyalar ışığı emerek albedoyu ya da reflektiviteyi azaltır; böylece gezegeni ısıtır. Ne var ki beyaz papatyalar da "sıcak"

hava isterler, demek ki onlar da tercihen sıcaklığın artması halinde gelişeceklerdir. Siyah papatyalar soğuk hava ister. Bu nitelikler bir dizi diferansiyel denklemle gösterilebilir; papatya dünyası da bir bilgisayarda hareket eder halde düzenlenebilir. Geniş bir başlangıç şartları yelpazesi bir denge çekicisine doğru yöneltecektir - bunun mutlaka statik bir denge olması da gerekmez.

"Bu sadece kavram düzeyindeki bir modelin matematik bir modelidir; sizin istediğiniz de budur - biyolojik ya da sosyal sistemlerde, aslına 'sahibinin sesi' derecesinde sadık modeller istemezsiniz," diyen Abraham şunları da sözlerine ilave ediyordu: "Modelin içine sadece albedoları koyun, başlangıç için bir miktar ekim yapın ve milyarlarca yıllık evrimin önünüzden geçtiğini oturup seyredin. Sonra da çocuklara gezegenimizin yönetim kurulu üyeleri olarak nasıl daha başarılı olabileceklerini öğretin."

Karmaşık bir dinamik sistemin timsali ve dolayısıyla, birçok bilim adamına göre karmaşıklıkla ilgili bütün yaklaşımların mihenk taşı insan vücududur. Fizikçilerin elindeki hiçbir araştırma konusunda makro düzeyden mikro düzeye kadar her ölçekteki ritim karşıtı hareketlerden oluşan böyle bir kakofoni daha olamaz: Kasların, akışkan maddelerin, akımların, liflerin, hücrelerin hareketini düşünün. Fiziksel hiçbir sistemde redüksiyonizme düşkünlüğün bu kadarı görülmemiştir: Her organın kendi ayrı mikro yapısı ve kendi ayrı kimyası vardır, fizyoloji öğrencileri sırf bu parçaların isimlerini öğrenmek için yıllarını verir. Oysa bir de bu parçaları kavramanın ne kadar güç olduğunu düşünün! Daha elle tutulur bir örnek isterseniz, insan vücudunun görünürde iyi tanımlanabilen bir kısmı, karaciğer gibi bir organ olabilir. Ya da dolaşım sistemi gibi, mekânı zorlayan katı ve sıvı maddelerden oluşmuş bir ağ olabilir. Veya bağışıklık sistemi gibi, lemfositleri ve T4 mesaj taşıyıcıları olan, vücudu istila eden organizmalara ilişkin verileri şifrelemek ve bunların şifrelerini çözmek için minyatür hale getirilmiş bir kripto cihazı şeklinde, gözle görülmeyen bir küme olarak, "trafik" ya da "demokrasi" kadar gerçekten de soyut bir şey olabilir. Bu

gibi sistemlerin anatomisi ve kimyası hakkında ayrıntılı bilgiye sahip olmadan bunları incelemeye kalkışmak gereksiz bir gayret olur, bu nedenle kalp uzmanları karıncık kas dokusu içinde iyon naklini, beyin uzmanları her göz kasının adını, yerini ve amacını öğrenirler. 1980'li yıllarda kaos, yepyeni türde bir fizyolojiyi hayata geçirdi; bu fizyolojinin temelinde yatan düşünceye göre, bilim adamları matematiksel araçlar sayesinde, yerel düzeydeki ayrıntılarla ilgilenmek zorunda kalmadan global karmaşık sistemleri anlayabilmekteydi. Araştırıcılar vücudun bir hareket ve salınım merkezi olduğunu giderek daha iyi kavradılar ve vücuttaki çeşitli vuruş ve atış seslerini dinlemek için yöntemler geliştirdiler.[3] Böylece dondurulmuş mikroskop kesitlerinde veya günlük kan örneklerinde görülemeyen ritimler buldular. Solunum bozukluklarındaki kaosu incelediler. Alyuvar ve akyuvar hücrelerinin kontrolundaki feedback mekanizmalarını araştırdılar. Kanser uzmanları hücrelerin büyüme çevrimindeki periyodiklik ve düzensizlik üzerinde fikir yürüttüler. Psikiyatrlar antidepresif ilaçların uygulanmasına ilişkin olarak çok boyutlu yaklaşımlar üzerinde araştırmalar yaptılar. Ancak, organlardan biriyle ilgili olarak yapılan şaşırtıcı buluşlar, bu yeni fizyolojinin yükselişini tamamen gölgeledi; bu organ kalpti; kalbin canlı ritmi, istikrarlı ya da istikrarsız da olsa, sağlıklı ya da patolojik de olsa hayat ile ölüm arasındaki ayrımın en kesin ölçüsünü veriyordu.

David Ruelle bile formalizmden ayrılıp kalpteki kaos hakkında spekülasyonlar yapmıştır; bir yazısında, kalpten "hepimiz için hayati önemi olan dinamik bir sistem,"[4] diye bahsediyordu.

"Normal kardiyak rejim periyodiktir, ancak periyodik olmayan (karıncık fibrilasyonu gibi) birçok patolojiler de vardır ki bunlar insanı istikrarlı bir duruş durumuna, yani ölüme götürür. Kalbin çeşitli dinamik rejimlerini simüle edebilen gerçekçi bir matematiksel modelin bilgisayarda incelenmesi sayesinde, tıpta büyük yararlar sağlanabileceği görülmektedir."

Amerika Birleşik Devletleri ve Kanada'daki araştırıcılar çeşitli ekipler halinde bu çağrıya karşılık verdiler. Kalp atış-

larındaki düzensizlikler çok uzun zaman önce keşfedilmiş, araştırılmış, izole edilmiş ve gruplandırılmıştı. Tecrübeli bir kulak, düzinelerle düzensiz ritmi birbirinden ayırt edebilir. Tecrübeli bir göz, elektrokardiyogramın dikenli şekillerinden, düzensiz bir ritmin kaynağı ve vahameti hakkında birtakım ipuçları çıkarabilir. Konunun uzmanı olmayan normal bir insan, çeşitli ritim bozukluğu türleri için icat edilen isimlerin bolluğuna bakıp problemin zenginliği hakkında bir hükme varabilir. Kalbin ektopik atışları, elektrik alternansları ve torsades de pointes'ları vardır. Yüksek dereceli blok ve kaçış ritimleri vardır. Parasistol (atriyal, vantriküler, pür ya da modüle) vardır. Wenckebach ritimleri (basit ya da kompleks) vardır. Taşikardi vardır. İnsanın yaşamını olumsuz etkilemesi bakımından bunların arasında en zararlı olanı fibrilasyondur. Ritimlere verilen bu isimler, aynı vücudun çeşitli kısımlarına verilen isimler gibi, hekimleri rahatlatır. Kalp rahatsızlıklarına tanı koyarken daha kesin bir sonuç belirlemeyi ve hastanın problemini daha akıllı bir biçimde ele almayı sağlar. Buna karşılık, kaos araçlarından yararlanan araştırıcılar, klasik kardiyolojinin, anlamakta güçlük çektiği nedenleri gölgede bırakmak için yapay gruplandırmalara üstünkörü başvurup düzensiz kalp atışları konusunda yanlış genellemeler yaptığını keşfetmeye başladılar.

Bu araştırıcılar dinamikle kalp arasındaki ilişkiyi keşfettiler. Eğitimleri ve tecrübeleri bakımından bunlar hemen hemen her zaman sıradan insanlardan farklı olmuşlardı. Montreal'deki McGill Üniversitesinden Leon Glass fizik ve kimya öğrenimi görmüş, bu alanlarda sayılarla ve düzensizlikle de haşir neşir olarak doktora tezini sıvılarda atomların hareketi konusunda verdikten sonra, düzensiz kalp atışları meselesine dönmüştü. Glass'a göre, kalp uzmanlarının ortak bir özelliği, birbirinden farklı birçok ritim bozukluğuna kısa elektrokardiyogram şeritlerine bakarak tanı koymalarıdır. "Hekimler buna bir şekil tanıma problemi olarak, daha önce pratikte ya da ders kitaplarında gördükleri şekilleri teşhis etme meselesi olarak bakıp öyle tedavi ederler. Gerçekten de, bu ritimlerin dinamiğini ayrıntılı bir biçimde analiz et-

mezler. Oysa dinamiğin incelenmesi, insanın ders kitaplarına bakıp tahminde bulunmasından çok daha dolgun bir yöntemdir."[5]

Boston'daki Beth İsrael Hastahanesinin ritim bozuklukları laboratuvarının ikinci müdürü olarak görev yapan Ary L. Goldberger, Harvard Tıp Fakültesinde kalp araştırmalarının, fizyologlarla matematikçiler ve fizikçiler arasında başlatılacak bir işbirliğinde başlangıç noktası olacağı inancındaydı. "Yeni bir sınıra ulaşmış durumdayız,"[6] diyordu. "Burada dallanmalar, ani davranış değişiklikleri görmekteyiz; klasik lineer modellerde bunları bize izah edebilecek hiçbir şey bulamazsınız. Açıkçası, bizim yeni cins modellere ihtiyacımız var, bunu da bize ancak fizik biliminin sağlayabileceği anlaşılıyor." Goldberger ve diğer bilim adamları bilimsel dil ve kurumsal tasnif engellerini aşmış kimselerdi. Goldberger'e göre, çok önemli bir engel birçok fizyologun matematiğe karşı duyduğu antipatinin yarattığı rahatsızlıktı. "1986 yılında bile, fizyoloji kitaplarında fraktal sözlerini bulamazsınız," diyordu. "Umarım, 1996'da fraktalsız bir fizyoloji kitabı bulmanız mümkün olmaz."

Kalbin atışlarını dinleyen bir doktor akışkan maddenin akışkan maddeye, akışkan maddenin katı maddeye ve katı maddenin gene katı maddeye sürtüşmesinden doğan şırıltıyı ve çarpma seslerini duyar. Kan odadan odaya dolaşır, arkasındaki kasların kasılmasıyla sıkışır, sonra da yolunun üzerindeki cidarları gerer. Lifli kapakçıklar kanın geri akışını önlemek için kulağın duyabildiği bir şakırtı sesiyle kapanır. Kalp adalesinin kasılmaları da üç boyutlu kompleks bir elektriksel faaliyet dalgasına bağlıdır. Kalbin davranışının tek bir veçhesini modellemek bir süper bilgisayarın gücünün sınırlarını zorlar; kalbin çevrimini bütün giriftliğiyle modellemek imkânsızdır. Boeing şirketi için uçak kanatları ya da Ulusal Havacılık ve Uzay İdaresi (NASA) için motorlardaki akışları dizayn eden bir akışkanlar dinamiği uzmanı için gayet doğal şeyler olan bu tür bilgisayar modellemeleri, tıp teknologlarının çok yabancısı oldukları uygulamalardır.

Mesela deneme ve yanılma yöntemi, yapay kalp kapakçıklarının yani, doğal kapakçıkları aşınan insanların şimdi hayatını uzatan metal ve plastik cihazların dizaynında çok önemli rol oynamıştır. Mühendislik tarihinde, doğanın kendi hafif, esnek, yarı saydam, paraşüte benzeyen üç minicik kupa biçimindeki kalp kapakçığına özel bir yer verilmesi gerekir. Kalbin pompalama yapan odalarına kanın girebilmesi için kapakçığın zarif bir şekilde yol vermesi gerekir. Kalp kanı ileriye doğru bastığında kanın geri gelmesini önleyebilmek için kapakçığın içinin dolması ve basınç dolayısıyla hızla kapanması gerekir; kaldı ki bunu sızdırmadan, yırtılmadan iki, üç milyar kere yapmak zorundadır. Mühendislerin insan yapısı kapakçıkları bu kadar iyi olmamıştır. Suni kapakçıkların biçimi, genelde tesisatçılıktaki örneklerinden alınmış; "bilyalı kafes" şeklindeki dizaynlar hayvanlar üzerinde denenmiş; bu da çok pahalıya malolmuştur. Sızdırma ve gerilim altında bozulma gibi açıkça bilinen problemlerin üstesinden gelmek epeyi zor oluyordu. Bir sorun daha vardı ki, onu ortadan kaldırmanın ne kadar zor olduğunu kolay kolay anlamak mümkün değildi. Sıvının kalp içindeki akış kalıpları değiştirildiğinde, suni kapakçıklar türbülans alanları ve durağanlık alanları yaratmaktadır; kan durağanlık haline geçince içinde pıhtılar oluşur; pıhtı kopup beyne giderse beyinde damar tıkanması sonucu felce neden olur. Suni kapakçıkların yapılmasındaki en büyük engel böyle bir pıhtılaşma sorunu yaratması olmuştur. Ancak 1980'li yılların ortalarında, New York Üniversitesinin Courant Enstitüsündeki matematikçilerin[7] bu probleme karşı yeni bir bilgisayar modelleme sistemi kullanması üzerine, kalp kapakçıkları tasarımı için mevcut teknolojinin bütün imkânlarını değerlendirmek fırsatı doğdu. Bu matematikçiler bilgisayarlarında çarpan bir kalbin hareketinin resimlerini yaptı; bu resimler iki boyutlu olmasına rağmen ne ifade ettikleri gayet iyi anlaşılıyordu. Kan hücrelerini temsil eden yüzlerce benek kapakçığın içinde geçip akmakta, kalbin elastiki cidarlarını germekte ve dönen girdaplar yaratmaktadır. Matematikçiler kalbin, klasik akışkan akışı problemine yüksek dü-

zeyde komplekslik ilave ettiğini buldular; çünkü gerçekçi bir model kalbin iç duvarlarının elastikiyetini dikkate almak zorundadır. Kan kalbin yüzeyini dinamik ve nonlineer olarak değiştirir, çünkü havanın uçak kanadı üzerinden aktığı gibi katı bir yüzey üzerinde akmamaktadır.

Ritm bozuklukları problemi ayrıntıları daha çok, üstelik çok daha öldürücü sonuçları olan bir sorundu. Kalp karıncığı fibrilasyonu sadece Amerika Birleşik Devletleri'nde her yıl yüz binlerce ani ölüme sebebiyet vermektedir. Bu vakaların birçoğunda fibrilasyonun kendine özgü, iyi bilinen bir nedeni vardır: Toplardamarın tıkanarak kanı pompalayan kasın ölümüne yol açması. Kokain kullanımı, asabi stres, hipotermi gibi nedenler de insanlardaki fibrilasyon riskini arttırır. Çoğu vakalarda, fibrilasyonu başlatan nedenin üzerindeki esrar perdesi kaldırılamamaktadır. Fibrilasyon krizi geçirdikten sonra hayatta kalabilen bir hastanın doktorunun aklında, kalpte bir hasar - bir nedenin varlığının kanıtı - kalıp kalmadığını görmek vardır. Görünürde sağlıklı bir kalbe sahip olan bir hastanın yeni bir kriz geçirme riski gerçekte daha yüksektir.[8]

Fibrilasyonlu kalp için yapılan klasik bir teşbih vardır: Bir çanta dolusu kurta benzetilir. Kalp kasları kasılıp gevşemek yerine, yani tekrarlı ve periyodik olarak kasılıp gevşeyeceği yerde koordinasyonsuz olarak ve çaresizlik içinde, büzülüp kırışarak kanı pompalar. Normal çarpan bir kalpte, elektrik sinyali kalbin üç boyutlu yapısı içinde koordineli bir dalga olarak yol alır. Sinyal geldiğinde bütün hücreler kasılır. Sonra her hücre uyarmaya cevap veremeyip kritik bir süre boyunca gevşer, bu süre içinde erkenden yeni bir kasılma yapması mümkün değildir. Fibrilasyonlu bir kalpte bu dalga parçalanır. Kalp ne tamamen kasılabilir ne de tamamen gevşeyebilir.

Fibrilasyonun çetrefilli özelliklerinden biri de kalbi oluşturan birçok öğenin ayrı ayrı gayet normal çalışabilmesidir. Çoğu zaman kalbin düzenli çarpışını yöneten düğümler düzenli elektrik sinyalleri göndermeye devam eder. Kas hücrelerinin her birinden doğru yanıtı alır. Her hücre uyarımını

alır, kasılır, uyarımı yanındaki hücreye aktarır ve bir sonraki uyarım gelinceye kadar gevşeme durumuna geçer. Otopside, adale dokusu hiçbir hasar göstermeyebilir. İşte bundan ötürü, kaos uzmanları yeni ve global bir yaklaşımın gerektiğini düşünmüşlerdir: Fibrilasyonlu bir kalbin bazı bölümleri çalıştıkları izlenimini vermekte, oysa kalp, bütünü itibariyle iflâs derecesinde bozulabilmektedir. Fibrilasyon karmaşık bir sistemin düzensizliklerinden biridir; aynı şekilde, zihinsel bozukluklar da - kimyasal kökenli olsa da olmasa da - karmaşık bir sistemin düzensizliklerindendir.

Kalbin fibrilasyonu kendi kendine yok olmaz. Bu tür kaos istikrarlı bir kaostur. Ancak bir defibrilasyon cihazından verilecek bir elektrik deşarjı (her dinamikçi böyle bir deşarjın yoğun bir pertürbasyon olduğunu bilir) kalbi tekrar eski düzenli durumuna geri getirebilir. Genelde, defibrilatörler işe yarar cihazlardır. Ne var ki, suni kalp kapakçıkları gibi, defibrilatörlerin tasarımı çalışmalarında da tahminlerin büyük rolü oldu. Teorik biyolog Arthur T. Winfree, "Bu deşarjın büyüklüğünü ve şeklini belirlemek tamamen ampirik bir çalışmaya dayanmıştır,"[9] diyordu. "Bu konuda elimizde hiçbir teori olmamıştır. Oysa şimdi bazı varsayımların doğru olmadığı görülüyor. Defibrilatörlerin etkinliklerini birkaç kat arttırmak, dolayısıyla başarı şansını defalarca arttırmak için bunların tasarımının yeni baştan ele alınması gerektiği görülüyor. Diğer anormal kalp ritimleri için de, bazı ilaçlar birlikte verilerek hastaların tedavisine uğraşılmış, yani bunlar da büyük ölçüde deneme yanılma yöntemine dayandırılmıştır; Winfree, bunlara "kara büyü" demektedir. Kalbin dinamiğini teorik bazda doğru bir şekilde anlamadan, verilen bir ilacın ne gibi etkileri olacağını öngörmeye kalkışan aldanır. "Zar fizyolojisinin ıcığının cıcığının çıkarıldığı, kalbin muazzam kompleks olan bütün bölümlerinin ayrıntılı ve dakik mekanizmalarının araştırıldığı son yirmi yıl zarfında müthiş işler yapılmıştır. Yapılan çalışmaların büyük kısmı doğru yoldadır. İhmale uğramış görünen kısmı diğer tarafıdır, yani kalbin nasıl çalıştığı hakkında global bir bakış açısı oluşturma çalışmalarıdır.

Winfree'nin ailesinde lise düzeyinde tahsil görmüş kimse yoktu. Kendi anlattığına bakılırsa o da hayata atıldığında doğru dürüst bir eğitim görmüş sayılmazdı. Babası hayat sigortacılığı mesleğinde çekirdekten yetişip şirketin genel müdür yardımcılığına kadar yükselmişti; hemen her yıl ABD'nin Doğu Yakasında oradan oraya ev taşırlardı; bu yüzden Winfree liseyi bitirinceye kadar bir düzineden fazla okul değiştirdi. Dünyada ilginç olan ne varsa hepsinin biyoloji ve matematikle bir ilişkisi olduğu gibi bir hisse kapılan Winfree, ayrıca, bu iki bilim dalının standart biçimde bir araya getirilmesi halinde bunun, kendisini ilgilendiren konulara bir yararı olmadığı yolunda bir fikre de kapılmıştı. Bu yüzden standart bir görüş benimsememeyi kararlaştırdı. Cornell Üniversitesi Fen Fakültesinde beş yıllık fizik öğrenimini tamamladı; bu öğrenim sırasında uygulamalı matematik ve pratik deneylerde kullanılan her türlü laboratuvar tekniklerini öğrenme fırsatını buldu. Savunma sanayii alanında çalışmaya hazırlanarak doktorasını biyoloji alanında yaptı; araştırmasında deneyle teoriyi bir araya getirmek için birtakım yeni usuller bulmaya çalışmıştı. Doktorasına Johns Hopkins'te başladı, Fakülte ile arasında bazı anlaşmazlıklar doğması üzerine Princeton'da devam etti, orada da Fakülte ile arasında bazı anlaşmazlıklar doğması üzerine, doktora diplomasını nihayet Princeton'dan aldı; bu sırada kendisi epeyi uzaklarda, Chicago Üniversitesinde ders vermekteydi.

Winfree, fizyolojik problemler konusunda yaptığı çalışmalara güçlü bir geometri perspektifi katan[10] biri olarak biyologlar çevresinde ender rastlanan düşünürlerden biridir. Biyolojinin dinamiğini araştırmaya 1970'li yılların başlarında başladı ve biyolojik saatleri - yirmi saatte bir tekrarlanan fizyolojik ritimleri inceledi. Bu alan aslında geleneksel olarak doğa bilimci yaklaşımlarla ele alınmaktaydı: filan ritim falan hayvana tekabül eder, vs. denirdi. Winfree biyolojik ritimlerin matematiksel bir düşünce sistemine uygun düşmesi gerektiğine inanıyordu. "Kafamın içi nonlineer dinamik denklemleriyle doluydu; bu sorunun bu tür niteliksel terimlerle düşünülebileceğini, hatta böyle düşünülmesi gerektiğini an-

ladım. Biyolojik saatlerin mekanizmasının ne olduğu hakkında kimsenin hiçbir fikri yoktu. Bu yüzden iki tercihiniz vardır. Ya oturup biyokimyacıların saatlerin mekanizmasını anlamalarını ve sonra da bilinen mekanizmalardan birtakım davranış biçimleri türetmeye çalışmalarını bekleyeceksiniz ya da saatlerin, kompleks sistemler teorisi, nonlineer ve topolojik dinamik terimlerine uygun olarak nasıl çalıştığını incelemeye başlayacaksınız. Ben de bunu yapmaya giriştim."[11]

Bir ara laboratuvarında bir kafes dolusu sivrisinek vardı. Kampçıların iyi bildiği gibi, sivrisinekler her sabah şafakla birlikte uyanırlar. Laboratuvarın dört duvarı içinde, sivrisineklere gündüz ve geceyi göstermeyecek şekilde sıcaklık ve ışık sabit tutulduğunda, sivrisineklerin içinde yirmi dört saatlik değil yirmi üç saatlik bir çevrim bulunduğu meydana çıkmaktadır. Her yirmi üç saatte bir vızıldamaları özellikle yoğunlaşarak dolaşmaya başlamaktadırlar. Dışarıda yaşadıkları sırada sivrisineklerin normal günün ritmine uymalarını sağlayan şey her gün aldıkları ışık deşarjıdır; gerçekten de ışık deşarjı sivrisineklerin saatini ayarlamaktadır.

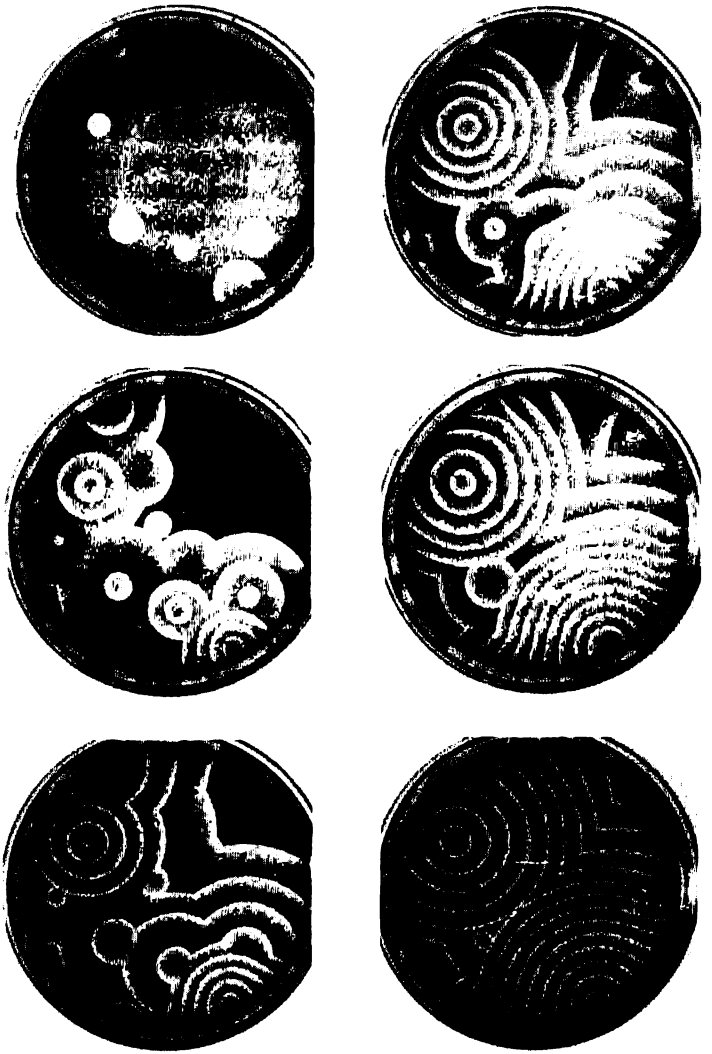
Winfree sivrisineklerinin üzerine, dozunu dikkatle ayarlayarak yapay ışık yöneltti. Bu uyarımlar sivrisineklerin bir sonraki çevrimini ya öne alıyor ya da geriletiyordu; bunun üzerine, bu uyarımın yarattığı etkinin grafiğini, hayvanları maruz bıraktığı ışığın zamanlamasının fonksiyonu olarak çizdi. Sonra da bu deneyin içerdiği biyokimya hakkında tahminler yürütmek yerine, problemi topolojik yaklaşımla ele aldı - yani, verilerin sayısal ayrıntılarına değil niteliksel şekline baktı. O anda şaşırtıcı bir sonuçla karşılaştı: Geometride bir *tekillik* vardı; diğer bütün noktalardan farklı bir nokta bulunuyordu. Bu tekilliğe bakarken, özel ve zamanı tamamen dakik bir şekilde seçilmiş ani bir aydınlatmanın, sivrisineklerin biyolojik saatinin hatta diğer bütün biyolojik saatlerin tamamen bozulmasına neden olduğunu öngördü.

Şaşırtıcı olmasına rağmen bu öngörüyü, Winfree'nin deneyleri de teyit ediyordu. "Tam gece yarısı gidip bir sivrisineğe bir miktar foton verin; zamanını özellikle iyi ayarladığınız takdirde, bu deşarj sivrisineğin biyolojik saatini alt üst

eder. Bundan sonra uykusu kaçmıştır - tamamen gelişigüzel bir şekilde bir süre kestirir, arkadan bir süre vızıldar ve siz onu gözlemekten bıkıncaya ya da başka bir deşarj verinceye kadar o da aynı şeyleri yapmaya devam eder. Siz böylece sivrisineğe ebedi bir jet lag* vermiş olursunuz."[12] 1970'li yılların başlarında, biyolojik ritimler konusunda Winfree'nin kullandığı matematiksel yaklaşım genelde pek fazla ilgi çekmedi; kaldı ki, bu gibi laboratuvar tekniklerini, küçük kafeslerin içinde aylarca oturmaya gelmeyecek canlı türlerine teşmil etmek de gayet zordu.

İnsanların maruz kaldığı jet lag ve uykusuzluk hali biyolojinin henüz çözemediği problemler listesinde yer almaktadır. Bunlara karşı yapılacak en büyük sahtekârlık, hiçbir işe yaramayan uyku hapları veya mucizevi şuruplar vermektir. Araştırıcılar denek olmaya rıza gösteren insanlar üzerinde yaptıkları deneylerde dağlar kadar veri topladılar; bu denekler genellikle "zaman izolasyonu" içinde yaşamak karşılığında haftada birkaç yüz dolar kazanmak isteyen öğrenciler, emekliler ya da yazdığı bir piyesi bitirmesi gereken oyun yazarları oluyordu: Zaman izolasyonunda güneş ışığı, sıcaklık değişmesi, saat ve telefon yoktu. İnsanların bir uyku-uyanıklık çevrimi bir de vücut sıcaklığı çevrimi vardır; bunların ikisi de hafif pertürbasyonlara uğradıktan sonra kendi kendisini yeniden düzelten nonlineer salınımlardır. İzolasyon halinde, günlük ayarı yeniden yapacak bir uyarımdan yoksun olunca, sıcaklık çevrimi yaklaşık yirmi beş saatlik bir süre olarak görünmekte, uyku sırasında düşük değerlere inmektedir. Alman araştırıcılar tarafından yapılan deneylerde birkaç hafta sonra, uyku-uyanıklık çevriminin sıcaklık çevriminden koptuğu ve rasgele bir hal aldığı bulundu. İnsanlar uyumadan yirmi ya da otuz saat uyanık kalıyor, ondan sonra da on ya da yirmi saat uyuyorlardı. Denekler hem günlerinin uzamış bulunduğunun farkına varmıyor hem de böyle olduğu kendilerine söylendiğinde inanmak istemiyorlardı. Araştırıcılar, Winfree'nin insanları konu alan sistematik yaklaşımını ancak

*Uçakla uzun bir yolculuk yapan kişilerde görülen yorgunluk ve uykusuzluk hali. (ç.n.)



KİMYASAL KAOS. Eş merkezli çemberler halinde dışa doğru yayılan dalgalar, hatta spiral dalgalar çok incelenmiş bir kimyasal reaksiyon olan Beluzov-Zhabotinsky reaksiyonunun içindeki kaos işaretleridir. Buna benzer şekiller, içinde milyonlarca amip bulunan tabaklarda da gözlenmiştir. Arthur Winfree'nin teorisine göre, bu tür dalgalar, kalp kası içinde, düzenli ya da rasgele biçimde yayılan elektriksel faaliyet dalgalarına benzer.

1980'li yılların ortalarında uygulamaya giriştiler; deneylere önce, her akşam parlak bir ışığın altında gergef işleyen orta yaşlı bir kadınla başladılar. Kadının çevrimi ani bir değişiklik gösterdi ve kendisini, üstü açık bir arabada gider gibi çok iyi hissettiğini söyledi.[13] Winfree'ye gelince, kalbin ritimleri konusuna geçmişti bile.

Gerçekte, Winfree'ye sorarsanız "geçmişti" sözü yanlış oluyordu. Çünkü Winfree'ye göre konu aynı konuydu - kimyası farklı, dinamiği aynıydı. İki kişinin aniden kalp krizinden ölüşüne çaresizlik içinde şahit olması dolayısıyla kalp konusa özellikle ilgi duymuştu;[14] bunlardan biri yaz tatilinde birlikte olduğu bir akrabası, diğeri de Winfree'nin yüzdüğü bir havuzdaki bir adamdı. Bir ömür boyu, iki ya da üç milyar kere kesintisiz çevrimleriyle, hem istirahat hem stres halinde, hızlanarak yavaşlayarak doğru düzgün devam etmiş bulunan bir ritim, nasıl oluyor da birdenbire çıldırıp kontrol edilemez, ölümcül bir hareket haline dönüşüveriyordu?

Winfree, George Mines adlı eski bir araştırıcının hikâyesini anlatırdı; Mines 1914'te yirmi sekiz yaşındaydı. Montreal'de McGill Üniversitesindeki laboratuvarında, kalbe dakik bir şekilde düzenlenmiş küçük elektrik impulsları verebilen küçük bir cihaz yapmıştı.

Winfree şöyle yazıyordu: "Mines çalışmalarını insanlar üzerinde yapma zamanı geldiğine karar verdiğinde, deneyleri için en kolay bulabileceği kişiyi seçti: Kendisini. O akşam saat altı civarında, laboratuvardan normalin dışında, hiçbir ses gelmeyişinden kuşkulanan bir kapıcı içeriye girdi. Mines, laboratuvar masasının altında, etrafında karmakarışık bir sürü elektrik telleri ve cihazlarıyla boylu boyunca yerde yatıyordu. Göğsünde kalbinin üzerinde kırık bir mekanizma bağlı duruyordu; yanındaki bir cihaz da gittikçe yavaşlayan kalp atışlarını kaydediyordu. Mines kendine gelemeden öldü."[15]

Tahmin edileceği gibi küçük fakat dakik bir şekilde zamanlanmış bir şok kalbi fibrilasyon haline sokabilir, gerçekten de bunu Mines bile, ölümünden çok az önce tahmin etmişti. Diğer şoklar, tıpkı biyolojik ritimde olduğu gibi, kalbin bir sonraki atışını öne alabilir ya da geciktirebilir. Buna

karşılık kalplerle biyolojik saatler arasındaki bir fark, hatta basitleştirilmiş bir modelde bile göz ardı edilemeyecek bir fark, kalbin uzayda bir şekle sahip olmasıdır. Kalbi ellerinizin içinde tutabilirsiniz. Bir elektrik dalgasını üç boyut üzerinde takip edebilirsiniz.

Ancak bunu yapmak biraz da maharet ister.[16] Duke Üniversitesinin Tıp Merkezinden Raymond E. Ideker, Winfree'nin 1983'te *Scientific American* dergisinde yazdığı bir makaleyi okudu; nonlineer dinamik ve topolojiye dayalı fibrilasyonun başlatılması ve durdurulmasına ilişkin dört tahmin üzerinde dikkatle durdu. Ideker gerçekte bunlara inanmıyordu. Biraz fazla zorlama izlenimi veriyordu; kardiyolog gözüyle bakınca da çok soyut görünüyordu. Üç yıl içinde, öngörülerin dördü de test edilmiş ve teyit olmuştu; Ideker kalp konusundaki dinamikçi yaklaşımını geliştirmek için gerekli olan bol miktardaki verileri toplamak amacıyla ileri düzeyde bir programı yönetiyordu. Winfree'nin dediği gibi, bu "bir siklotronun kalpteki muadilidir."[17]

Klasik elektrokardiyogramda sadece tek boyutlu bir kayıt görünür. Kalp ameliyatı yapan bir cerrah bir elektrodu alıp kalbin üstünde bir yerden başka yere dolaştırır, böylece on dakikalık bir sürede elli, altmış kadar noktayı örnekleyerek bir nevi karma bir görüntü meydana getirir. Fibrilasyon sırasında bu teknik hiçbir işe yaramamaktadır. Kalp çok daha hızlı değişmekte ve çarpmaktadır. İdeker'in yöntemi, bilgisayarın gerçek zamanda yaptığı işleme sıkı sıkıya bağımlı bir yöntem olarak 128 elektrottan meydana gelen bir ağı tıpkı ayağa giyilen bir çorap gibi, kalbin üstüne geçirmekti. Her dalga kasın içinden geçtikçe, elektrotlar voltaj alanını kaydediyor ve bilgisayar bir kalp haritası çiziyordu.

Winfree'nin teorik fikirleri dışında, İdeker'in başlangıçta niyeti kalp fibrilasyonunu durdurmakta kullanılan elektrik cihazlarını geliştirmekti.[18] Acil tıbbi yardım ekiplerinde defibrilatörlerin standart versiyonları bulunur; bunlar fibrilasyona uğramış hastanın göğüs kafesinin arasından kalbe güçlü bir doğru akım şoku göndermekte kullanılır. Kardiyologlar, yaptıkları deneyler sonucunda, özellikle risk taşıdığı dü-

şünülen hastaların göğüs boşluğunun içine yerleştirilmek üzere bir implant cihazı geliştirmişlerdir; ne var ki hastalara risk tanısı koymak başlı başına çözüme muhtaç bir sorundur. Vücudun içine yerleştirilebilen bir defibrilatör, kalp pilinden biraz daha büyük olmakla birlikte, orda durup beklemekte, kalbin düzenli atışlarını dinlemekte ve gerek duyulduğu zaman bir elektrik deşarjı salmaktadır. Ideker defibrilatörlerin dizaynı konusunu pahalı bir tahmin oyunu olmaktan çıkarıp bir bilim kolu haline getirebilmek için gerekli olan fiziksel bilgileri bir araya toplamaya başladı.

Kendi özel dokusunda birbiriyle bağlantılı lif dalları oluşturan ve kalsiyum, potasyum ve sodyum iyonları taşıyan hücreleri olan kalbe kaos yasalarını uygulamanın nedeni ne olabilirdi ki? McGill Üniversitesinde ve Massachusettes Institute of Technology'deki (Massachusetts Teknoloji Enstitüsü) bilim adamlarına bilmece gibi gelen soru da işte buydu.

MacGill'de, Leon Glass ile meslektaşları Michael Guevara ve Alvin Schrier nonlineer dinamiğin bütün o kısa tarihi içinde en fazla sözü edilen araştırmalardan birini gerçekleştirdiler. Yedi günlük tavuk embriyonlarından aldıkları küçücük kalp hücrelerini bir araya toplayıp deneylerinde kullandılar.[19] Çapları ancak santimetrenin 1/80'i kadar olan bu hücre topakları bir kaba konup birlikte çalkalanınca, dışardan ritmi sağlayacak hiçbir şey olmadan, kendi kendilerine saniyede bir kere olmak üzere atmaya başladılar. Akış hareketini mikroskopta mükemmel bir şekilde görmek mümkündü. Bir sonraki aşamada, dışardan da bir ritim uygulandı; McGill'li bilim adamları bunu bir mikroelektrotla yaptılar; kullandıkları mikroelektrot camdan yapılmış, ucu iyice incelen ve hücrelerden birinin içine giren ince bir tüptü. Tüpün içinden bir elektrik akımı geçiyor ve bu sırada hücreleri istendiği şekilde ayarlanabilen bir güç ve ritimle uyarıyordu.

McGill'li araştırıcılar bulgularını 1981'de *Science* dergisinde yayınladılar: "Daha önceleri matematik araştırmalarında ve fiziksel bilimlerdeki deneylerde rastlanan dış etkenli dinamik davranış, genellikle belki de biyolojik salınıcı-

ların periyodik olarak pertürbasyona uğradığı zamanlarda da vardı."[20] Periyodun ikiye katlandığını - uyarımın değerleri değiştikçe dallanan, sonra tekrar dallanan çarpma kalıplarını - gördüler. Poincaré dönüşümleri yaptılar ve ve çember fonksiyonlarını kullandılar. İnceledikleri konulara intermitensiyi ve frekans kilitlenmesini de dahil ettiler. Glass, "Belirli bir uyarım ile küçük bir tavuk kalbi parçası arasında birbirinden farklı birçok ritim bulabilirsiniz,"[21] diyordu. "Nonlineer matematiği kullanarak değişik ritimleri ve bunların ortaya çıkış sırasını iyice anlayabiliriz. Bugün kardiyologlar eğitimlerinde hemen hemen hiç matematik görmüyorlar, ancak bizim bu sorunlara bakış tarzımızı gelecekte, bir yerde herkes benimsemek zorunda kalacaktır."

Bu arada, Harvard ile M.I.T.'nin birlikte yürüttüğü bir sağlık bilimleri ve teknolojisi programında, aynı anda hem kardiyolog hem de fizikçi olan Richard J. Cohen adlı bir bilim adamı köpekler üzerinde yaptığı deneylerde, bir dizi periyot katlanmasıyla karşılaştı. Bilgisayar modelleri kullanmak suretiyle mantığa uygun gelen bir senaryoyu test etti; bu senaryoda elektriksel faaliyetin dalgası doku adacıkları üzerinde dağılıp bölünmekteydi. Cohen, "Gördüğüm sonuç, Feigenbaum fenomeninin açık bir kanıtıdır,"[22] dedi, "öyle düzenli bir fenomen ki, bazı şartların gerçekleşmesi durumunda, kaotik hale geçmektedir; bundan da anlaşıldığı üzere, kalp içindeki elektriksel faaliyet ile kaotik davranış oluşturan diğer sistemler arasında birçok benzerlikler vardır."

McGill Üniversitesindeki bilim adamları eski verilere de yönelip çeşitli türdeki anormal kalp atışlarıyla ilgili olarak birikmiş verileri incelediler. Doktorların iyi tanıdığı bir sendroma göre, kalpteki anormal ektopik atışlar, normal sinüs atışlarının arasında dağılmış vaziyettedir. Glass ve arkadaşları bu atış kalıplarını inceleyip ektopik atışlar arasındaki sinüs atışlarını saydılar. Bu atışların sayısı insandan insana değişmekle birlikte, bazı kimselerde her nedense daima tek sayı olarak çıkıyordu: 3, 5 veya 7 gibi. Diğer bazı kimselerde ise normal atışların sayısı hep belirli bir diziyi takip ediyordu: 2, 5, 8, 11 . . . .

Glass, "İnsanlar bu tuhaf rakamlarla gözlemler yapmışlardır, ama mekanizmaları anlamak her zaman kolay olmamıştır,"[23] dedi. "Çoğu zaman bu sayılarda bir tür düzenlilik vardır; ancak çoğu zaman da büyük bir düzensizlik vardır. Bu işleri bilenlerin sloganlarından biri de 'kaos içinde düzen'dir."

Fibrilasyonla ilgili görüşler geleneksel olarak iki yönde gelişmiştir. Bu alandaki klasik düşüncelerden birine göre, atış hızını ayarlayan ikinci derecedeki sinyaller kalp kasının içindeki anormallik merkezlerinden gelmekte ve bunlar esas sinyallerle çelişmekteydi. Bu minik ektopik merkezler eşit olmayan aralıklarla dalgalar yayar; bunların etkileşimi ve örtüşmesi sonucunda kasılmayı sağlayan dalganın koordinasyonunu bozduğu sanılmıştır. McGill'deki bilim adamları araştırmalarında, bir dış uyarı ile kalp dokusunun bünyesinden kaynaklanan bir ritim arasındaki etkileşimden bir dizi dinamik davranış bozuklukları doğabileceğini göstererek bu görüşü kısmen destekleyen kanıtlar elde etmişlerdir. Ancak, hız ayarlayan ikinci derecedeki merkezlerin neden ilk önce oluştuğu sorusunun cevabını vermek hâlâ mümkün olamamıştır.

İkinci görüş elektrik dalgalarının yayılmaya başlamasını esas almak yerine bu dalgaların kalp üzerindeki coğrafi dağılım şeklini esas alıyordu; Harvard-M.I.T. araştırma grubunun eğilimi bu görüşü benimsemek şeklinde oldu. Küçük daireler halinde dönen dalgadaki anormalliklerin bir "yeniden giriş"e neden olabildiğini bulmuşlardır; bu süreçte bazı bölgeler yeni bir vuruşa çok erkenden başlayarak kalbin pompalama faaliyetini koordineli bir şekilde devam ettirmesi için gerekli olan dinlenme aralığını sağlayan kısa duruşu yapmasını önlemektedir.

Bu iki araştırma grubu da, nonlineer dinamik yöntemlerini azami ölçüde kullanmaları neticesinde, parametrelerin birindeki küçük bir değişmenin - mesela zamanlamadaki ya da elektrik iletkenliğindeki bir değişmenin - normalde sağlıklı olan bir sistemi dallanmanın başladığı bir noktanın ötesine götürerek nitelik itibariyle yeni bir davranışa doğru ite-

bileceğini öğrendiler. Daha önce birbiriyle ilgisi olmadığı sanılan düzensizlikler arasında bağlantılar kurarak kalp sorunlarını global düzeyde incelemek için ortak bir çerçeve bulmaya başladılar. Kaldı ki, Winfree uzmanlık alanlarının farklı olmasına rağmen, ektopik vuruş ekolünün de, yeniden giriş ekolünün de haklı oldukların inanıyordu. Winfree'nin topolojik yaklaşımı bu iki görüşün birbirinden farkı olmadığını, aslında aynı şeyi savunduklarını ortaya koyuyordu.

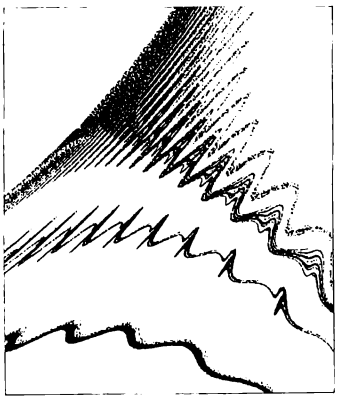
Winfree, "Dinamik olaylar genellikle sezgiye ters düşer, kalp de bu kuralın istisnası değildir,"[24] diyordu. Kardiyologlar, araştırma sayesinde, fibrilasyon riski olanları önceden teşhis etmenin bilimsel bir yolunun bulunabileceğini ümit ediyor; böylece defibrilasyon cihazları dizayn edip ilaç tedavisi vermeyi düşünüyorlardı. Winfree de bu gibi sorunlara global bir matematiksel bakış açısı getirilirse Amerika Birleşik Devletleri'nde daha pek mevcut olmayan bir bilim dalı olan teorik biyolojinin geliştirilebileceği ümidindeydi.

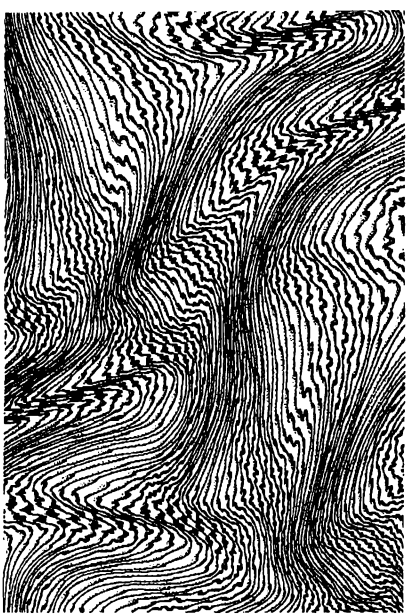
Günümüzde fizyologlardan bazıları dinamik hastalıklardan bahsetmektedir: bunlar sistemlerdeki düzensizlikler, koordinasyon ya da kontrol bozuklukları gibi hastalıklardır. Mesela şöyle bir ifade duyarsınız: "Normalde salınan sistemlerin salınımı durur ya da yepyeni ve beklenmedik bir biçimde salınmaya başlar; normalde salınmayan sistemler ise salınmaya başlar."[25] Bu sendromlar şu solunum düzensizliklerini de içerir: Soluma, iç çekme, Cheyne-Stokes solunumu ve ani bebek ölümü sendromuna bağlı olan bebek apneası. Bir de dinamik kan düzensizlikleri vardır; bunlara akyuvarlarla alyuvarların, platelet ve lemfositlerin dengesini bozan pertürbasyonlar içeren bir lösemi türü de dahildir. Bazı bilim adamları, bazı depresyon biçimlerinin yanı sıra şizofreninin de bu kategoriye girebileceği görüşünü öne sürmektedirler.

Fizyologlar ise sağlıkta da kaosu görmeye başlamışlardır. Feedback süreçlerindeki nonlineerliğin düzenlemeye ve kontrol etmeye yaradığı uzun zaman önce anlaşılmış bulunmaktadır. Daha basit bir ifadeyle, lineer bir sürece küçük bir şok uygulandığında, bu süreç doğrultusunu hafifçe değiştirir. Aynı şokun uygulandığı nonlineer bir süreç ise başlan-

gıç noktasına dönme eğilimi gösterir. On yedinci yüzyılda, hem sarkaçlı saatin hem de klasik dinamik biliminin icat edilmesinde büyük bir rol oynamış olan Hollandalı fizikçi Christian Huygens bu düzenleme biçiminin en büyük örneklerinden birine rastladı; belki de hikâye böyle anlatılıyor. Huygens bir gün, duvarda asılı duran bir sarkaçlı saatler dizisinin, bir koronun şarkı söyleyişi gibi mükemmel bir senkronizasyon içinde sallandıklarını fark etti. Saatlerin bu kadar dakik olamayacağını biliyordu. Sarkaçlarla ilgili olarak o zaman mevcut olan matematiksel tanımlama, bir sarkaçtaki düzenin başka bir sarkaca yayılmasındaki esrarı izah edebilecek hiçbir bilgiyi içermiyordu. Huygens doğru bir tahminde bulunarak, tahta aracılığıyla iletilen titreşimlerin saatler arasında koordinasyon sağladığına hükmetti. Düzenli bir çevrimin başka bir çevrime kilitlendiği böyle bir fenomene biz bugün trenleşme veya frekans kilitlenmesi diyoruz. Frekans kilitlenmesi ayın yüzünün neden hep yeryüzüne dönük olduğunu ya da daha genelde, uyduların neden, eksenleri üzerinde, kendi yörünge periyotlarına oranı 1'e 1 veya 2'ye 1 ya da 3'e 2 gibi birtakım tam sayılar olan periyotlarla dönme eğiliminde olduğunu izah etmektedir. Bu oran bir tam sayıya yaklaştığı zaman, uydunun gelgit olayını yaratan çekimindeki nonlineerlik uyduyu kilitlemeye yönelmektedir. Frekans kilitlenmesi elektronikte de rastlanan bir olaydır; mesela bir radyonun aldığı sinyallerin frekansında ufak tefek dalgalanmalar olduğunda bile alıcının bu sinyallerin üzerinde kilitlenmesini mümkün kılar. Frekans kilitlenmesi kalp hücreleri ve sinir hücreleri gibi biyolojik salınıcılar da dahil, salınıcılardan oluşmuş kümelerin senkronizasyon halinde çalışabilme yeteneğinin temelindeki nedendir. Bunun doğadaki çarpıcı bir örneği Güneydoğu Asya'da yaşayan bir tür ateş böceklerinin çiftleşme dönemlerinde ağaçlarda toplanmaları ve binlerce böceğin aynı anda müthiş bir ahenk içerisinde yanıp sönmeleridir.

Bütün bu kontrol fenomenlerindeki en hayati sorunlardan biri de dayanıklılık sorunudur: bir sistemin küçük deşarjlara dayanabilme gücü ne kadardır? Biyolojik sistemlerde buna





KAOTİK AHENKLER. Radyo frekansları ya da gezegenlerin yörüngeleri gibi farklı ritimler arasındaki etkileşim kaosun değişik bir türünü yaratır. Yukarıda, üç ritmin bir araya gelmesinden kaynaklanabilen bazı "çekiciler"in bilgisayar resimleri verilmiştir.

ilaveten bir de esneklik sorunu vardır: Bir sistemin bir frekanslar *yelpazesi* içindeki çalışma gücü ne kadardır? Tek



KAOTİK AKIŞLAR. Ağdalı bir akışkan içine daldırılan bir çubuk basit, dalgalı bir şeklin oluşmasına neden olur. Birkaç kere daldırılırsa daha komplike şekiller görünür.

bir frekans üzerinde kilitlenmiş bir sistem adeta esarete tabi olmuş gibidir; değişime uyum gösterme yeteneğinden yoksun kalır. Organizmalar çok hızla değişen ve öngörülemez olan şartlara karşı duyarlılık göstermeye mecburdur; en basit fiziksel modellerin katı periyodiklikleri içine ne kalp atışını ne de solunum ritmini kilitleyebilirsiniz; bu husus, insan vücudundaki daha da hassas diğer bütün ritimler için de aynen geçerlidir. Harvard Tıp Fakültesinden Ary Goldberger'in de dahil olduğu bir grup araştırıcıya göre, sağlıklı bir organizmanın dinamiğinde fraktal fiziksel yapılar en önemli rolü oynamaktaydı; akciğerdeki bronşların dallanmasından ve kalpteki iletken liflerden oluşan bu yapılar geniş bir ritimler yalpazesinin meydana gelmesini sağlıyordu. Goldberger, Robert Shaw'un argümanları üzerinde kafa yorduktan sonra şöyle yazdı: "Boyutsuz, geniş dalgaboylu spektrum değerleriyle bir arada bulunan fraktal süreçler 'enformasyondan yana zengin' süreçlerdir. Buna karşılık periyodik haller dar bir spektrum bandını ifade eder ve enformasyon içeriğini tamamen kaybetmiş monoton, tekrarlı dizilerle tanımlanır."[26] Ary Goldberger olsun ya da başka fizyologlar olsun, bu tür düzensizliklerin tedavisinde bir sistemin spektrum rezervleri, sistemin kilitli bir periyot kanalına düşmeden birçok değişik frekanslara yayılabilme kabiliyeti esas alınabilir.

Şizofrenlerin gözlerinin hareketleriyle ilgili konuşması sırasında Bernardo Huberman'ın yardımına yetişen Arnold Mandell adlı San Diego'lu psikiyatr ve dinamikçi, fizyolojide kaosun yeri ve önemi konusunda daha da ileri gitti. "Matematiksel patolojinin, yani kaosun sağlık anlamına gelmesi, matematiksel sağlığın yani bir yapıdaki öngörülebilirlik ve farklılaşmanın ise hastalık anlamına gelmesi mümkün müdür?"[27] Mandell daha 1977 yılında kaosla ilgilenmeye başlamıştı; beyindeki belirli bazı enzimlerde bulduğu "özel bir davranış biçimi"nin ancak nonlineer matematikteki yeni yöntemlerle açıklanması mümkündü. Araştırmalarında, protein moleküllerinin üç boyut üzerinde salınarak birbirlerine bir örgü gibi dolaşmasını aynı terimlerle incelemeyi teşvik etmişti; Mandell'in iddiası, biyologların statik yapıla-

rın resmini çizmek yerine bu tür molekülleri, faz geçişleri yapmaya muktedir dinamik sistemler olarak görüp anlamaya çalışmaları gerektiği şeklindeydi. Mandell kendisinin de fanatik bir bilim adamı olduğunu ve aslında, bir organ ne kadar kaotik ise o kadar fazla ilgisini çektiğini söylüyordu. "Biyolojide dengeye kavuştuğunuz anda ölmüşsünüz demektir,"[28] diyordu. "Size beyninizin denge halindeki bir sistem olup olmadığını sorsam yapacağınız tek şey, kendi kendinize birkaç dakika boyunca 'filleri düşünmeyeceğim,' diye telkin etmektir, siz de hemen *anlarsınız* ki beyniniz denge halindeki bir sistem değildir."

Mandell'e göre, kaosla ilgili olarak yapılan buluşlar psikiyatrik bozuklukların tedavisinde başvurulan klinik yöntemlerde bir değişiklik yapılmasını zorunlu kılmaktadır. Objektif ölçülere vurulduğu takdirde, modern "psikofarmakoloji"nin - yani anksiyete ve uykusuzluktan şizofreniye kadar her şeyin ilaçla tedavi edilmesinin - aslında bir başarısızlık olarak değerlendirilmesi gerekir. Hastalar arasında iyileşeni çok azdır, hatta belki de hiç yoktur. Zihinsel hastalıkların en şiddetli tezahürleri kontrol altında tutulabilir, ne var ki uzun vadede sonuçlarının ne olacağını kimse bilemez. Mandell'in, en fazla kullanılan ilaçlarla ilgili olarak yaptığı bir değerlendirme meslektaşlarının tüylerini ürpertti.[29] Şizofrenlere verilen fenotiazinler asıl bozukluğu daha da kötü hale getirmektedir. Trisiklik antidepresifler "siklotimik etkileri arttırarak uzun dönemde, psikopatolojik epizotların nüksetme sayısını arttırmaktadır." Bu böylece devam eder. Mandell, sadece lityumla tıbbi açıdan bazı başarılar elde edildiğini ve bunların da sadece bazı bozukluklarda sağlandığını söylüyordu.

Mandell, sorunu kavramsal düzeyde bir sorun olarak görüyordu. Bu "en istikrarsız, dinamik, sonsuz boyutlu mekanizma"yı tedavi etmek için başvurulan klasik yöntemler lineer ve redüksiyonistti. "Temelinde yatan paradigma şöyledir: bir gen -> bir peptid -> bir enzim -> bir nöro iletici -> bir alıcı -> bir hayvan davranış biçimi -> bir klinik sendrom -> bir ilaç -> bir klinik değerlendirme ölçeği. Bu

paradigma psikofarmakolojideki hemen bütün araştırma ve tedavi yöntemlerini yönetir. 50'den fazla iletici, binlerce çeşit hücre, karmaşık bir elektromanyetik fenomenoloji, ayrıca proteinlerden elektroansefalogramlara kadar, temelinde sürekli istikrarsızlık bulunan her düzeydeki otonom faaliyetler - ve bütün bunlara rağmen beyine hâlâ engelli bir yarışı kontrol eden kimyasal bir kontrol masası gözüyle bakılmaktadır."[30] Nonlineer dinamik dünyasının yabancısı olmayan bir kimsenin buna vereceği tek bir cevap vardır: Bu kadar da saflık olmaz. Mandell meslektaşlarından, zihin gibi karmaşık sistemleri destekleyen esnek geometrileri anlamaya çalışmalarını ısrarla istedi.

Diğer birçok bilim adamı kaosun formalizmini yapay zekâya ilişkin araştırmalarında uygulamaya başladılar. Mesela çekim havzaları arasında dolanıp duran sistemlerin dinamiği sembolleri ve hafızaları modellemek için bir çare arayanlara çok cazip geldi.[31] Fikirleri, belli belirsiz sınırları olan, birbirinden ayrı fakat üst üste çakışan, mıknatıs gibi çeken ama gitmesine de izin veren bölgeler halinde düşünen bir fizikçi, normalde, "çekim havzaları" olan bir faz uzayının görüntüsüne dönecektir. Bu gibi modellerde, istikrarsızlıkla karışık istikrar noktaları ve sınırları değişebilen bölgeler gibi doğru özelliklerin bulunduğu sanılıyordu.[32] İnsan zihninin düşünceler, kararlar, duygular ve bilinçle ilgili diğer ne kadar marifet varsa hepsini üretebilme yeteneği bakımından en önemli rolü oynayan özelliği, tek referansının kendisi olması gibi sınırsız bir niteliktir ki, bunu da meydana getiren, bahis konusu bu modellerin fraktal yapısıdır. İster kaosla ister kaossuz olsun, ciddi ve bilgili bir bilim adamının, insan zihninin statik bir yapı olarak modelini kurması artık mümkün değildir. Böyle bir bilim adamı, nöronun keşfinden bu yana, akışkanlardaki türbülansa ve diğer karmaşık dinamik süreçlere özgü olan mikro ölçekli ve makro ölçekli etkileşimin gerçekleşmesini sağlayan bir ölçekler hiyerarşisini teşhis etmektedir.

Şekilsizliğin ortasında doğan şekil: Biyolojinin asıl güzelliğini ve temelindeki muammayı işte böyle tanımlayabilirsi-

niz. Hayat, bir düzensizlik ummanından düzen emer. Kuantum mekaniğinin öncülerinden ve biyoloji uzmanlık alanı olmamasına rağmen bu alana da dalmaktan çekinmeyen birçok fizikçiden biri olan Erwin Schrödinger, bu düşünceyi bundan kırk yıl önce şöyle ifade etmişti: Canlı organizmalarda "öylesine şaşırtıcı bir yetenek vardır ki, bununla 'düzen akımı'nı kendi üzerlerinde yoğunlaştırır ve böylece atomik kaos halinde dağılıp parçalanmaktan kurtulurlar."[33] Schrödinger'e göre, fizikçi gözüyle, canlı maddenin yapısının meslektaşlarınca incelenen maddeden farklı olduğu apaçıktı. Hayatın yapı taşları - o zamanlar bunlara daha DNA denmiyordu - *aperiyodik bir kristaldi*. "Fizikte şimdiye kadar sadece *periyodik kristaller* üzerinde durduk. Mütevazi bir fizikçinin düşüncesine göre, bunlar gerçekten ilgilenmeye değer ve komplike nesnelerdir; bunlar öyle harika ve karmaşık maddi yapılardır ki, hareketsiz doğa bunları kullanarak kendi zekâsını bilmece halinde sunmaktadır. Oysa, aperiyodik kristalle kıyaslandığında, periyodik kristallerin fazla bir özelliği olmadığını görürsünüz."[34] İkisi arasındaki fark duvar kâğıdıyla halı arasındaki farka benziyordu; yani bir yanda düzenli bir şekilde tekrarlanan aynı deseni, öte yanda ise yaratıcı bir sanatçının eseri olan zengin ve birbiriyle tutarlı desen çeşitlemelerini görüyordunuz. Fizikçiler sadece duvar kâğıdını anlamayı öğrenmişlerdi. Bu yüzden biyoloji alanında pek fazla katkıları olmayışına şaşmamak gerekirdi.

Schrödinger'in bakış tarzı alışılmış görüşlerden farklıydı. Hayatın hem düzenli hem de karmaşık oluşu bir gerçeğin ifadesiydi; aperiyodikliği hayatın kendine özgü nitelikleri olarak görmek ise mistisizme kadar uzanan bir yorumdu. Schrödinger'in zamanında, ne matematik ne de fizik, bu düşüncesini destekleyecek kanıtları sağlayabilecek durumda değildi. Düzensizliği hayatın yapı taşları olarak analiz etmeye yarayacak araçlar da yoktu. Bugün bu araçlar mevcuttur.

Kaos ve Ötesi

"Şimdi burada bugüne kadar hiç denenmemiş bir şeyi, bir kaosu meydana getiren unsurları sınıflandırmaya çalışacağız."

HERMAN MELVILLE,
Moby Dick

Bundan yirmi yıl önce, Edward Lorenz atmosferi, Michel Hénon yıldızları, Robert May doğanın dengesini düşünüyordu. Benoit Mandelbrot IBM'in tanınmamış bir matematikçisi, Mitchell Feigenbaum New York City College'de üniversite öğrencisi, Doyne Farmer New Mexico'da büyüyen bir çocuktu. Faal olarak çalışan bilim adamlarının birçoğu karmaşıklık hakkında bir dizi ortak görüşü paylaşıyorlardı. Bu görüşlere öylesine sıkı sıkıya bağlanmışlardı ki bunları sözle ifade etmeye bile lüzum görmüyorlardı. Bu görüşlerin neler olduğunu söylemek ve bunları araştırma ve incelemeye açmak imkânı ancak daha ileriki tarihlerde bulunabilmiştir.

Basit sistemlerin davranış biçimleri de basit olur. Sarkaç gibi mekanik bir alet, küçük bir elektrik devresi, bir havuz içindeki idealleştirilmiş bir balık popülasyonu gibi sistemler birkaç yasaya indirgenebilse ve bunlar da mükemmelce anlaşılabilen, hiçbir kusuru olmayan determinist yasalar olsa bu sistemlerin uzun süreli davranışı istikrarlı ve öngörülebilir nitelikli olurdu.

Kompleks sistemlerin temelinde kompleks nedenler vardır. Mekanik bir cihaz, bir elektrik devresi, bir yabani hayvan popülasyonu, bir akışkanın akışı, biyolojik bir organ, bir parçacık demeti, atmosferdeki bir fırtına, bir ulusal ekonomi

- görünürde açıkça istikrarsız, öngörülemez ya da kontrol edilemez durumda olan bir sistem ya birbirinden bağımsız birçok öğe tarafından yönetilmek ya da dış etkenlerin gelişigüzel etkilerine tabi olmak zorundadır.

Farklı sistemlerin davranışları da farklıdır. Bütün bir ömrünü insan nöronlarının kimyasını incelemekle geçirdiği halde hafıza ya da algı hakkında hiçbir şey öğrenmemiş olan bir nörobiyologa, uçak dizaynında aerodinamik problemlerini çözebilmek için rüzgâr tünelleri kullandığı halde türbülansın matematiğini hiç anlamamış bir uçak mühendisine, satın alma kararlarının psikolojik temellerini analiz ettiği halde büyük ölçekli trendler hakkında tahminlerde bulunma becerisini geliştirememiş bir ekonomiste bakın; bunların hepsi de, kendi uğraştıkları bilim dalını meydana getiren unsurların birbirinden farklı olduğu bildikleri için, bu unsurların milyarlarcasından oluşmuş karmaşık sistemlerin de birbirinden farklı olması gerektiğini peşinen kabul etmişlerdir.

Şimdi bu görüşler tamamen değişti. Bu arada geçen yirmi yıl zarfında, fizikçiler, matematikçiler, biyologlar ve astronomlar alternatif bir görüş dizisi yaratmışlardır. Basit sistemlerden karmaşık davranış biçimleri çıkar. Daha da önemlisi, karmaşıklık yasalarının evrensel geçerliliği vardır; bir sistemi oluşturan unsurların ayrıntılarını hiç hesaba katmaz.

Faal durumdaki bilim adamları - parçacık fizikçileri, nörologlar hatta matematikçiler - bu değişikliği ilk anda hemen önemli görmediler. Kendi alanlarında yaptıkları bilimsel araştırma konularında çalışmaya devam ettiler. Ne var ki, kaos denilen bir şeyi de duymuşlardı. Bazı karmaşık fenomenlerin izah edilmiş bulunduğunu, diğer bazı fenomenler konusunda da birdenbire yeni izahlara ihtiyaç duyulduğunu biliyorlardı. Laboratuvarında kimyasal reaksiyonlar üzerinde çalışan veya alanda yürütülen üç yıllık bir deneyde böcek popülasyonlarını izleyen ya da okyanustaki sıcaklık değişmelerini modelleyen bir bilim adamı beklemediği dalgalanma veya salınımlarla karşılaştığında bunlara klasik bilim adamı tepkisi gösteremezdi; yani, bunları görmezden

gelemezdi. Bazıları için bu bayağı bir sıkıntı demekti. Diğer taraftan, pragmatik bir bakış açısından, bir tür matematiksel özelliği olan bu bilim için gerek federal hükümetin gerekse büyük şirketlerin araştırma merkezlerince kaynak tahsis edildiğini de biliyorlardı. Bu bilim adamlarının büyükçe bir bölümü, çok rasgele oldukları için çekmecelerin bir köşesinde unutulan eski verileri, kaos sayesinde yeni usullerle ele alma imkânı doğduğunun farkına vardılar. Bilim adamlarının büyük bir kısmı bilimdeki bölümlenmenin araştırmalarına engel teşkil ettiği hissine kapıldılar. Birçoğu da, parçaları bütün soyutlayıp incelemenin gereksizliğini hissettiler. Bu bilim adamlarına göre, kaos, bilimde redüksiyonist programın sonunu teşkil ediyordu.

Anlayamamak, mukavemet; öfke; kabul. Kaosu en uzun süre geliştirenlerin hepsi bu aşamalardan geçti. Georgia Institute of Technology'den Joseph Ford, 1970'li yıllarda bir termodinamikçi grubuna konferans verdiğini ve konuşmasında, sürtünmeye maruz kalan basit bir salınıcı modeli olarak ders kitaplardan çok iyi bilinen Duffing denkleminde kaotik bir davranış bulunduğundan bahsettiğini hatırlıyordu. Ford'a göre, Duffing denkleminde kaosun mevcut olması merak uyandıran bir olaydı - doğru olduğuna gerçekten inandığı nadir şeylerden biriydi, oysa *Physical Review Letters* dergisinde yayınlanması için daha birkaç yıl beklemek gerekecekti. Ne var ki, Ford bir paleontoloji toplantısında paleontologların karşılarına geçip dinozorların tüyleri olduğunu da söylese bile pek fark etmezdi. Onlar, böyle bir şeyin olmayacağını nasıl olsa biliyorlardı.

"Ben bunu ne zaman söyledim ki? Aman yarabbim, dinleyiciler hop oturup hop kalkmaya başladılar. Durum sanki şuna dönmüştü: 'Babam Duffing denklemiyle oynamıştı, dedem de Duffing denklemiyle oynamıştı, hiçbiri senin söylediğin gibi bir şeyle karşılaşmadı.' Tabiatın komplike olduğu düşüncesi hepsinin itiraz etmesine neden oluyordu. Bu husumetin sebebini bir türlü anlamıyordum."[1]

Bir kış günü dışarda güneş ufukta kaybolurken, Atlanta'daki ofisinde rahatça oturan Ford, üzerinde parlak renk-

lerle KAOS kelimesi yazılı kocaman bir bardak elinde, kolasını yudumluyordu. Kendisinden daha genç olan meslektaşı Ronald Fox, oğlu için bir Apple II satın aldıktan kısa bir süre sonra düşüncelerinde meydana gelen değişikliklerden bahsediyordu; aslında devir, kendine saygısı olan hiçbir fizikçinin çalışmalarında kullanmak için böyle bir makine satın almayacağı bir devirdi. Fox, Mitchell Feigenbaum'un feedback fonksiyonlarının davranışını yönlendiren evrensel yasaları keşfettiğini duyunca bu davranışı Apple'ının ekranında görebilmek için kısa bir program yazmaya karar verdi. Programı çalıştırınca ekranın boydan boya bunlarla renklendiğini gördü - gördükleri, yaba biçiminde dallanmalar, ikiye, sonra dörde, sonra sekize bölünen istikrarlı çizgiler; bizzat kaosun ortada görünüşü; kaosun içinde de şaşırtıcı bir geometrik düzenlilikti. Fox, "Feigenbaum'un bütün yaptıklarını iki günde aynen yapabilirsiniz,"[2] diyordu. Böylece kendi kendine bilgisayar öğrenmesi, hem Fox'u hem de yazılı bir argümanı şüpheyle karşılayan diğer bazı kimseleri ikna etmeye yaramıştı.

Bazı bilim adamları bu gibi programlarla bir süre eğlendiler, sonra da bıraktılar. Diğerlerinin ise değişmekten başka çaresi yoktu. Fox, klasik lineer bilimin limitlerinin bilincinde olmaya devam edenler arasındaydı. Geçmişte, normal olarak, çözümü zor olan nonlineer problemleri bir kenara bırakmış olduğunu biliyordu. Uygulamada, fizikçiler sonunda hep şöyle söyleyecektir: *Bu problem için özel fonksiyonlara ilişkin bir kitabı alıp incelemem gerekir; bu da benim hiç içimden gelmeyen bir şeydir, benim dünyada razı olmayacağım bir şey de bir makine alıp problemi makinede çözmektir, ben bunu yapmayacak kadar sofistike bir insanım.*

Fox, "Nonlineerliğin genel manzarası birçok insanın dikkatini çekti; bu başlangıçta yavaş yavaş oldu, fakat tedricen arttı," diyordu. "Bu manzaraya bakan herkes bundan yararlandı. Bilimin hangi dalında olursanız olun, şimdi baktığınız herhangi bir probleme evvelce de baktığınız olmuştur. Eskiden bakarken bir yer vardı ki, oraya geldiğiniz anda nonlineer olduğu için bakmaktan vazgeçiyordunuz. Şimdi ise na-

sıl bakacağınızı biliyorsunuz, geriye dönüp eskileri tekrar ele alıyorsunuz."

Ford, "Yeni bir alan gelişmeye başlıyorsa bunun nedeni, bir grup insanın bundan kendilerine de bir şey düşeceğini hissetmiş olmalarıdır - araştırmalarını değiştirdikleri takdirde, sonuçta bunun ödülü belki de çok büyük olacaktır. Kaos bana bir rüya gibi geliyor. Bu tarafa geçip bu oyunu oynadığınız takdirde, kaosun sağladığı imkân sayesinde, piyangoda en büyük mükâfat size çıkabilir," diyordu.

Buna rağmen, hiç kimse kelime[3] üzerinde daha hâlâ tam bir anlaşma sağlayamamıştı.

Oxford'dan Cornell'e geçmiş beyaz sakallı matematikçi ve şair Philip Holmes'e göre: *Bazı dinamik (genellikle alçak boyutlu) sistemlerin komplike, aperiyodik, çekici yörüngeleri.*

Kaosla ilgili tarihi değeri olan birçok makaleyi tek ciltlik bir referans kitabında toplayan Hao Bai-Lin adlı Çinli fizikçiye göre: *Periyodikliği olmayan bir düzen türü. Ayrıca: Hızla gelişen bir araştırma alanı; bu alana matematikçilerin, fizikçilerin, hidrodinamikçilerin, çevre bilimcilerin ve daha birçoklarının çok önemli katkıları olmuştur. Bir de: Doğal fenomen sınıfları arasında, çok yeni anlaşılmış ve her yerde geçerli olanlarından biri.*

Long Island'daki Brookhaven Ulusal Laboratuvarında çalışan H. Bruce Stewart adlı deneysel bir fizikçiye göre: *Basit bir determinist (saat dakikliğiyle çalışan) sistemin içindeki gelişigüzel görünüşlü tekerrür etmesi muhtemel bir davranış biçimi.*

Yale Üniversitesinden Roderick V. Jensen adlı kuantum kaosun ihtimallerini araştıran teorik bir fizikçi göre: *Determinist, nonlineer dinamik sistemlerin düzensiz, öngörülemeyen davranışı.*

Santa Cruz Kulübünden James Crutchfield'e göre: *Metrik entropisi pozitif fakat, sınırlı olan bir dinamik. Bu ifade normal matematik diline şöyle tercüme edilebilir: enformasyon üreten (küçük belirsizlikleri büyüten - amplifiye eden) ancak, öngörülmesi kesinlikle mümkün olmayan davranış biçimi.*

Son olarak da, kendini kaos vaizi ilan eden Ford'a göre: *Düzenin ve öngörülebilirliğin boyunduruğundan nihayet kurtulmuş bir dinamik. . . . Kendi bütün dinamik imkânlarını gelişigüzelce araştıracak şekilde özgürleştirilmiş sistemler. . . . Heyecanlandırıcı bir çeşitlilik, tercih imkânlarının zenginliği, fırsatların bolluğu.*

İterasyonlu fonksiyonları ve Mandelbrot kümesinin sonsuz fraktal yabaniliğini araştıran John Hubbard, yaptığı çalışmaları tarif etmek için "kaos" adını yetersiz buluyor, kaosun gelişigüzellik fikrini içerdiğini düşünüyordu. Hubbard'a göre, verilmesi gereken asıl mesaj doğadaki basit süreçlerin gelişigüzelliği *olmayan* muazzam karmaşıklık binaları üretebileceği şeklindeydi.[4] Nonlineerlik ve feedback, insan beyni kadar zenginliği olan yapıları kodlamak ve sonra da açıp yaymak için gerekli ne araç varsa hepsini ihtiva ediyordu.

Biyolojik sistemlerin global topolojisini araştıran Arthur Winfree gibi diğer bazı bilim adamlarına göre ise kaos adı çok dar bir anlamda sıkışıp kalmıştı.[5] Feigenbaum'un tek boyutlu dönüşümleri ve Ruelle'in iki ya da üç (ve bir kesirli) boyutlu garip çekicileri gibi basit sistemleri ifade ediyordu. Winfree, düşük boyutlu kaosun özel bir durum teşkil ettiği görüşündeydi. Çok boyutlu karmaşıklık yasalarına ilgi duyuyor; hatta böyle yasaların mevcut olduğuna da inanıyordu. Görünürde, evrendeki fenomenlerin çok büyük bir bölümü düşük boyutlu kaosun etki alanı dışında kalıyordu.

Nature dergisi, yeryüzünün ikliminin bir garip çekiciyi takip edip etmediği konusunda sürdürülen bir tartışmaya sayfalarını açtı. Ekonomistler borsadaki trendlerde garip çekicilerin etkilerinin izlerini aradılarsa da şimdiye kadar hiçbir şey bulup çıkaramadılar. Dinamikçiler türbülansın tamamen oluşmuş şeklini izah edebilmek için kaos araçlarına başvurabileceklerini ümit ettiler. Şimdi Şikago Üniversitesinde bulunan Albert Libchaber, deneylerine hâkim olan zarif üslubunu türbülansın emrine tahsis ederek 1977 yılında kullandığı minik hücreden binlerce kere daha büyük bir sıvı helyum kutusu yaptı. Akışkanlardaki düzensizliği hem uzay hem de zaman itibariyle açığa çıkarıp serbest bırakan bu gi-

bi deneylerin basit çekicileri bulup bulamayacağını kimse bilmiyordu. Fizikçi Bernardo Huberman'ın söylediği gibi, "Türbülanslı bir nehriniz olsa ve içine bir sonda sarkıtıp 'İşte bakın, burada düşük boyutlu bir garip çekici var,' deseniz hepimiz şapkamızı çıkarır bakardık."[6]

Kaos öyle bir fikirler kümesiydi ki, bütün bu bilim adamları, kendilerini sanki ortak bir sermayeyi paylaşan bir şirketin hissedarları gibi hissediyorlardı. İster fizikçi ister biyolog isterse matematikçi olsun, hepsi de, basit ve deterministik sistemlerden karmaşıklık türediğine; klasik matematiğin gözünde çok karmaşık olan sistemlerin aslında basit yasalara tabi olduğuna; ayrıca, kendi uzmanlık alanları ne olursa olsun, asıl görevlerinin karmaşıklığın özünü anlamak olduğuna inanmaktaydı.

Gaia hipotezinin yazarı James E. Lovelock, "Şu termodinamiğin yasalarına bir daha bakalım,"[7] diye yazıyordu. "İlk bakışta Dante'nin Cehenneminin kapısındaki levhayı andırdıkları doğrudur. . ." Gerçekte öyle mi?

İkinci Yasa bilimin bize verdiği teknik nitelikli kötü haberlerden biridir; bilim dışı kültüre de iyice yerleşmiş bulunmaktadır. Her şey düzensizliğe doğru meyleder. Enerjiyi bir biçimden başka bir biçime dönüştüren her süreç bu enerjinin bir kısmını ısı olarak kaybeder. Tam ve mükemmel verimlilik mümkün değildir. Evren tek yönlü bir yola benzer. *Entropi hem evrende hem de evrenin içindeki herhangi bir hipotetik izole sistemde hep artmak zorundadır.* İkinci Yasayı nasıl formüle ederseniz edin, itiraz edilebilecek bir tarafı olmayan bir kural görünümündedir. Termodinamik bakımından tamamen doğrudur. Ancak bilimin epeyi dışına taşan alanlarda da İkinci Yasanın fikir düzeyinde kendine has bir yaşamı olmuş, toplumların dağılması, ekonomilerdeki çöküşler, ahlâkın bozulması gibi konusu çöküntü olan çeşit çeşit birçok olayda kabahat İkinci Yasaya yüklenmiştir. İkinci Yasaya esas işlevi dışında verilen bu mecazi anlamların yanlış bir yönlendirme olduğu özellikle şimdi anlaşılmaktadır. Dünyamızda karmaşıklık dal budak salmaktadır; bu yüzden, kaosun yasaları, tabiatın alışkanlıklarını genel dü-



DALLANMA VE KÜMELEŞME, (yan sayfa). Şekil formasyonunun incelenmesi, fraktal geometrinin de teşvikiyle, öyle doğal şekilleri bir araya getirmiştir ki, bunlar arasında bir elektrik deşarjının izlediği şimşek biçimindeki yollar ve simüle edilen gelişigüzel hareket eden parçacıkların bir araya gelişleri (küçük resim) gibi şekiller de vardır.

zeyde anlayabilmek için bilimi bir vasıta olarak görenlere çok daha yararlı olacaktır.

Evren kendi nihai denge durumuna doğru çekilip azami entropinin hiçbir özelliği olmayan sıcak banyosuna dalarken, her şeye rağmen, birtakım ilginç yapılar yaratmaya da muvaffak olmaktadır. Termodinamiğin sonuçta ortaya koyduğu eserlerin üzerinde duran ciddi fizikçiler şöyle bir sorunun kendilerini ne kadar rahatsız ettiğinin farkına varmışlardır;[4] bu fizikçilerden biri bu sorunu şöyle ifade etmiştir: "Enerjinin amaçsızca bir akışından nasıl oluyor da dünyaya hayat ve bilinç yayılıyor?" Entropi kavramının kaypaklığı bu sorunu daha da karmakarışık hale getirmektedir; termodinamiğin amaçlarına uygun olarak ısı ve sıcaklık terimleriyle oldukça iyi tanımlanmış bulunan entropi, kendisini bir *düzensizlik* ölçüsü olarak tespit etmeye kalkışanlara şeytanca numaralar çevirmektedir. Fizikçiler sudaki düzenin derecesini ölçmekte büyük güçlüklerle karşılaşmaktadır; çünkü su buz haline dönüşürken kristal yapılar oluşturmakta, bu arada enerji açığa çıkmaktadır. Buna karşılık termodinamik entropi, amino asitlerin, mikroorganizmaların, eşeysiz üreyen bitki ve hayvanların beyin gibi karmaşık enformasyon sistemlerinin oluşumundaki şekil veya şekilsizlik derecesinin değişmesi bakımından bir ölçü olmayı maalesef başaramamıştır. Muhakkak ki, evrim halindeki bu düzen adacıkları İkinci Yasaya uymak zorundadır. Asıl önemli yasalar, yaratılışın yasaları başka bir yerlerde bulunmaktadır.

Doğa şekiller meydana getirir. Bu şekillerden bazıları uzayda düzenli, ancak zamanda düzensizdir; bazıları da zamanda düzenli, uzayda düzensizdir. Bazı şekiller fraktaldir; boyutsuz yapılar gösterir. Diğer bazı şekiller ise ortaya düzenli durumlar ya da salınan durumlar çıkartır. Şekil formasyonu, fiziğin ve malzeme bilimlerinin bir kolu haline gelmiş; bi-

lim adamlarının parçacıkları kümeler halinde bir araya getirmelerini, elektrik deşarjlarının kırılmalı yayılmalarını, buz ve metal alaşımları içindeki kristallerin büyümesini simüle eden modeller kurmalarına imkân sağlamıştır. Bunun dinamiği çok yalın görünmesine rağmen - uzay ve zaman içinde değişen şekiller - bu şekillerin anlaşılabilmesini sağlayacak araçlar elimize daha yeni geçmiştir. Bugün artık, bir fizikçiye şu soruyu, içinde kinaye olmadan sormanız mümkündür: "Neden bütün kar tanecikleri birbirinden farklıdır?"

Buz kristalleri türbülanslı bir havanın içinde, simetri ve tesadüfün çok iyi bilinen karışımıyla harmanlanarak, altı katlı indeterminizme has bir güzellikle biçimlenirler. Su donarken, kristaller dışarı doğru küçük uçlar çıkartır; bu küçük uçlar büyür, sınırlarında istikrarsızlık oluşur ve yanlardan yeni küçük uçlar fışkırır. Kar taneleri şaşırtıcı bir inceliğe sahip olan matematik yasalarına riayet eder; bu küçük uçların tam olarak, ne kadar hızla büyüyeceklerini, çaplarının ne kadar olacağını ya da kaç kere dallanacaklarını öngörmek de mümkün olmamıştır. Bilim adamları yıllar boyunca, kar tanelerinin gösterdiği çeşitli şekillerin resmini çizip bunları yassı, sütunlu; kristal, polikristal; iğne, dendrit gibi kategorilerde gruplandırdılar. Eserlerinde, kristal formasyonunu bir sınıflandırma sorunundan ibaret gösterdiler, çünkü daha iyi bir yaklaşım bulamadılar.

Bu gibi uçların, dendritlerin büyümesi bugün artık ileri düzeyde nonlineer, istikrarsız, sınırları açık bir sorun olarak bilinmektedir ki, bunun anlamı, kompleks, kıpır kıpır oynayan bir sınır dinamik olarak değiştikçe modelin de bunu izlemesi gerekecek, demektir.[9] Katılaşma, buz kalıbında olduğu gibi dıştan başlayıp içeriye doğru ilerledikçe sınır genelde istikrarlı ve düzgün kalır, hızı da duvarların ısıyı açığa çıkarma yeteneğine bağlıdır. Buna karşılık bir kristal bir tohumdan başlayıp dışa doğru katılaştığında - bir kar tanesinin nem yüklü havada düştüğü sırada su moleküllerini yakalamasında olduğu gibi - bu süreç istikrarsız bir hal alır. Civarındaki moleküllerin biraz ötesine taşan herhangi bir sınır molekülü yeni su moleküllerini toplamak bakımından

diğerlerine göre öncelikli bir duruma geçer; bu yüzden de o kadar daha hızla büyür; buna "paratoner etkisi" denir. Böylece önce yeni dallar, sonra alt dallar biçimlenir.

Bir diğer güçlük de, bu sürece dahil olan birçok fiziksel kuvvetten hangilerinin önemli olduğunu, hangilerinin de güvenlikli bir biçimde göz ardı edilebileceğini tespit etmekti. Bilim adamlarının uzun zamandan beri bildikleri gibi, en önemlisi, su donduğu sırada açığa çıkan ısının yayılmasıdır. Ne var ki, ısı yayılması fiziği, araştırıcıların kar tanelerine mikroskop altında baktıkları ya da kar tanelerini laboratuvarda büyüttükleri zaman gördükleri şekilleri tam olarak açıklamaya yetmemektedir. Son zamanlarda bilim adamları başka bir süreci de buna katmanın bir çaresini buldular: Yüzey gerilimi. Yeni kar tanesi modelinin esası ile kaosun özü birbirinin aynıdır: İstikrar kuvvetleriyle istikrarsızlık kuvvetleri arasındaki nazik bir denge; atom ölçeğindeki kuvvetlerle normal ölçekteki kuvvetler arasındaki güçlü bir etkileşim.

Isı yayılmasının istikrarsızlık yaratma yönelimi gösterdiği yerlerde, yüzey gerilimi istikrar yaratır. Yüzey geriliminin çekişi, bir maddenin düzgün sınırları tercih etmesini sağlar; tıpkı sabun köpüğünün çeperi örneğinde olduğu gibi. Bu yönelimler arasındaki denge kristalin büyüklüğüne bağlıdır. Yayılma aslında, büyük ölçekli, makro düzeyde bir süreçtir, buna karşılık yüzey gerilimi mikro düzeydeki ölçeklerde en güçlü durumuna erişir.

Yüzey gerilimi etkilerinin bu kadar küçük olması dolayısıyla, araştırıcılar gelenek olarak, pratikte kolaylık sağlamak amacıyla, bunları ihmal edebileceklerini varsaymışlardır. Durum öyle değildir. En küçük ölçekler en hayati önemi haiz olan ölçeklerdi; bu ölçeklerde yüzey etkilerinin, katılaşan bir maddenin molekül yapısına karşı sonsuzca hassas oldukları meydana çıktı. Mesela buzu alırsanız moleküllerdeki doğal simetri, altı büyüme istikametinde bünyesel bir tercih imkânı sağlamaktadır. Bilim adamları istikrar ve istikrarsızlığın karışımı sayesinde mikro düzeydeki tercihin büyüyebildiğini ve böylece kar tanelerini oluşturan yarı yarıya fraktal dantelleri yarattığını hayretle gördüler. Bu ma-

tematiğin tanımını ise atmosfer bilimciler değil, teorik fizikçilerle bunların yanı sıra kendi sorunlarına çözüm arayan metalürji mühendisleri buldu. Metallerde molekül simetrisi farklıdır; bunun gibi, bir alaşımın dayanıklılığını belirlemeye yarayan karakteristik kristaller de farklıdır. Ancak, hepsinin matematiksel ifadesi aynıdır: Şekil formasyonunun yasaları evrenseldir.

Başlangıç durumuna hassas bağımlılık yok etmeye değil, yaratmaya yarar. Havada büyüyen bir kar tanesi, bütün kar taneleri gibi bir saat ya da daha uzun bir süre rüzgârla sürüklenip yeryüzüne düşerken, dallanan uçların an be an yaptıkları tercihler, sıcaklık, nem ve atmosferdeki toz zerreciklerinin varlığı gibi şartlara hassas olarak bağlı kalır. Tek bir kar tanesinin bir milimetrelik bir mekâna yayılan altı ucu aynı derecedeki sıcaklığa maruzdur; büyüme yasaları tamamen determinist olduğundan altı uç da mükemmele yakın bir simetriyi korur. Ancak, türbülanslı havanın doğası öyle bir şekildedir ki iki kar tanesinden her biri apayrı yollardan geçecektir. Böylece, kar tanesinin aldığı son şekil, içinden geçtiği hava şartlarında vuku bulan bütün değişmelerin tarihçesini gösterir; bu şartların kombinasyonları da sonsuz sayıda olabilir.

Fizikçiler kar tanelerinin denge-dışı fenomenler olduğunu söylemekten zevk duyarlar. Enerjinin, doğanın bir parçasından bir başka parçasına akışındaki dengesizliğin yarattığı ürünlerdir. Bu akış bir sınırı bir uç haline, bir ucu bir dallandırma haline, bir dallandırmayı evvelce hiç görülmemiş bir karmaşık yapı haline dönüştürür. Bilim adamları bu istikrarsızlığın kaosun evrensel yasalarına uyduğunu keşfedince, aynı yöntemleri daha bir sürü fiziksel ve kimyasal problemlere de uygulamakta başarılı olmuşlardır; sonra da, ister istemez sırada biyolojinin geldiğini düşünmektedirler. Bilgisayar simülasyonlarındaki dendrit büyümelerine bakarken, akıllarından yosunlar, hücre çeperleri, filizlenen ve bölünen organizmalar geçmektedir.[10]

Şimdi mikro düzeydeki parçacıklardan çevremizdeki kompleksliğe kadar birçok yolların açık olduğunu görüyoruz.

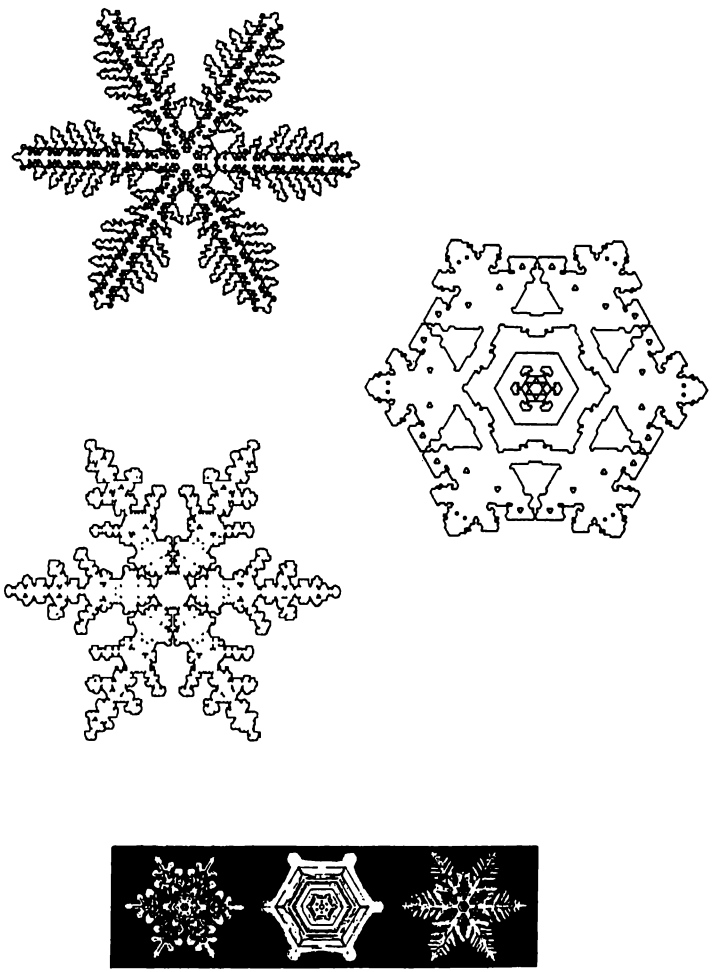
Matematiksel fizikte, Feigenbaum ve meslektaşlarının dallanma teorisi Amerika Birleşik Devletlerinde ve Avrupa'da daha da ilerlemektedir. Teorik fiziğin soyut alanlarında bilim adamları diğer bazı yeni sorunları iskandil etmektedirler; bunlar arasında kuantum kaosu gibi çözülemeyen bir problem de vardır: Kuantum mekaniği klasik mekaniğin kaotik fenomenlerini kabul eder mi? Libchaber hareketli akışkanları incelemek için dev sıvı helyum kutusunu imal etmekte, bu arada Pierre Hohenberg ile Günter Ahlers konveksiyon dalgalarının yer değiştirirken acayip biçimler göstermesini[11] incelemektedirler. Astronomide, kaos uzmanları meteoritlerin kökenini açıklamak için gravitasyondaki beklenmedik istikrarsızlıklardan yararlanmaktadır[12] - Mars'ın gerisinde uzaklardaki bir yerden, görünürde esrarengiz bir şekilde asteroidler fırlatılması olayı. Bilim adamları insanların bağışıklık sistemini ve bu sistemin milyonlarca öğesi ile öğrenme, hatırlama ve şekil tanıma kapasitesini incelemek için dinamik sistemler fiziğinden yararlanmakta ve aynı zamanda da uyum sağlama yeteneğinin evrensel mekanizmalarını bulmak ümidiyle evrimi incelemektedir. Bu gibi modelleri kuranlar, kendisini yeniden üreten,[13] rekabet eden ve doğal ayıklanma ile evrime uğrayan yapıları çok kısa zamanda görmektedir.

Joseph Ford, "Evrim, feedbackli kaostur,"[14] diyordu. Doğrudur, evren gelişigüzellik artı sönümdür. Ancak yönlendirilmiş gelişigüzellik şaşırtacak düzeyde komplekslik üretebilir. Lorenz'in de çok yıllar önce keşfettiği gibi, sönüm düzenin âmillerinden biridir.

Einstein'ın meşhur sorusuna Ford'un verdiği cevap şöyledir: "Tanrı evrenle karşılıklı zar atıyor."[15] "Ancak bu zarlar hilelidir. Şimdi, fiziğin asıl amacı da bu zarlara hangi kurallar kullanılarak hile karıştırıldığını ve bunları kendi işimize yarayacak şekilde nasıl kullanabileceğimizi bulmaktır."

Kolektif bir girişim olan bilim bu gibi görüşler sayesinde ilerlemektedir. Buna rağmen, bilimi her şeyden önce ve her zaman bir çalışma yöntemi sağlamaya mecbur olarak gören bilim adamlarını ayrı ayrı etkilemeye tamamen yeterli görü-





İSTİKRAR VE İSTİKRARSIZLIK ARASINDAKİ DENGE. Bir sıvı kristalleşirken, büyüyen bir uç meydana gelir (üç resimli fotoğrafta görüldüğü gibi) bunun sınırları istikrarsız hale gelir ve yanından dallar fışkırır (soldaki resim). Hassas termodinamik süreçlerin bilgisayar simülasyonlarında gerçek kar tanelerini andıran şekiller çıkmaktadır (yukarıdaki resim).

nen hiçbir felsefe, hiçbir kanıt, hiçbir deney yoktur. Bazı laboratuvarlarda geleneksel yöntemler artık tökezlemektedir. Normal bilim, Kuhn'un öne sürdüğü gibi, yoldan çıkmıştır; tek bir cihazın bütün beklentilere cevap verebilmesi mümkün olmamaktadır; "akademik kariyerin, istese de istemese de artık anormalliklerden uzak durması mümkün değildir."[16] Herhangi bir bilim adamının bakış açısından, kaos yöntemi bir zaruret olarak görülmedikçe kaos fikirlerinin egemen olması da mümkün değildir.

Her alanın kendine özgü örnekleri vardır. Ekolojide, Willam M. Schaffer vardı; Schaffer öğrenimini, 1950'li ve 1960'lı yıllarda bu alanın en eski ve en tecrübelisi olan Robert MacArthur'un en son öğrencisi olarak yapmıştı. MacArthur'un geliştirdiği tabiat kavramı *doğal denge* fikrine sağlam bir temel sağlamıştır. Kurduğu modellerde, birtakım dengelerin mevcut olduğunu, bitki ve hayvan popülasyonlarının da bunlara yakın durduğunu varsayıyordu. MacArthur'a göre doğadaki dengede ahlâki nitelik denebilecek bir şey daha vardı - modellerindeki denge statüleri gıda kaynaklarının en rasyonel şekilde, israfın en aza indirilerek kullanımını da gerektiriyordu. Doğayı kendi haline bıraktığınızda işler iyi gidiyordu.

Yirmi yıl kadar sonra, MacArthur'un son öğrencisinin fikir düzeyinde vardığı nokta, denge anlayışına dayalı bir ekolojinin akıbetinin kötü olacağı şeklindeydi. Klasik modeller bizzat kendi lineer eğilimlerinin ihanetine uğramaktadır. Doğa çok daha komplikedir. Bunun yerine MacArthur kaosu "hem heyecan verici hem de biraz tehditkâr"[17] olarak görmektedir. Arkadaşlarına, ekolojinin en sağlam, en dayanıklı varsayımlarını kaosun sarsabileceğini söyler. "Ekolojide temel kavram sayılan her şey azgın bir fırtınadan önceki sessizliğe benzer- şimdiki de, tam bir nonlineer fırtınadır."[18]

Schaffer garip çekicileri kızamık ve su çiçeği gibi çocuk hastalıklarının epidemiyolojisini araştırmakta kullanmaktadır.[19] Verilerini önce New York ve Baltimore'dan, sonra İskoçya'da Aberdeen'denr, İngiltere'den ve Galler Bölgesinden sağlamıştır. Kurduğu dinamik model, genliği küçük, kontrol-

lu bir sarkaca benzemektedir. Her öğretim yılı başında okula dönen çocuklar arasında yayılan salgınlar hastalıkları yönlendirmekte, çocukların doğal dayanıklılığı da hastalıkların çok yayılmasını önlemektedir. Schaffer'in modelinde bu hastalıkların birbirinden şaşırtıcı derecede farklı davranış biçimleri bulunduğu öngörülmektedir. Su çiçeği periyodik olarak değişmeler göstermektedir. Kızamık kaotik olarak değişmektedir. Bakarsanız, veriler de Schaffer'in öngörülerini doğrulamaktadır. Klasik epidemiyoloji anlayışına göre, kızamıktaki yıllık değişmelerin izahını yapmak mümkün değildir - gelişigüzel ve gürültülüdür. Schaffer faz uzayı inşası tekniklerini kullanmak suretiyle, kızamığın, fraktal boyutu 2.5 kadar olan bir garip çekiciyi takip ettiğini göstermektedir.

Schaffer ayrıca Lyapunov üslü sayılarını da hesaplamış ve Poincaré dönüşümleri çizmiştir. "Daha doğrusu,"[20] demiştir, "resimlere baktığınızda sanki oradan çıkıp üzerinize atlayacak gibidir; siz de 'Aman Tanrım,' dersiniz, 'bu aynı şey." Çekici kaotik olmasına rağmen, modelin determinist doğası çerçevesinde, öngörülebilirlik bir dereceye kadar mümkün olmaktadır. Bir yıl kızamık salgını yüksek düzeylere çıkarsa ertesi yıl bunu bir çöküş dönemi izleyecektir. Bir yıl salgın orta düzeylerde seyrederse bu düzey gayet küçük değişmeler gösterecektir. Salgının düşük düzeylerde seyrettiği bir yılda ise en büyük boyutta öngörülemezlik ortaya çıkmaktadır. Schaffer'in modeli genişletilmiş bağışıklama programları vasıtasıyla dinamiği bastırmanın sonuçlarını da - standart epidemiyoloji ile öngörmek mümkün olmayan sonuçları - öngörmüştür.

Gerek kolektif düzeyde gerekse kişisel düzeyde, kaosa ilişkin görüşler farklı nedenlerden dolayı farklı yollarda ilerlemektedir. Bazı bilim adamları gibi, Schaffer için de, klasik bilimden kaosa geçiş hiç beklemediği bir anda gerçekleşmiştir. Aslında, Robert May'in 1975'te yaptığı kutsal çağrı için Schaffer'den iyi bir hedef bulunamazdı; oysa May'in makalesini okumuş ve kaldırıp bir kenara atmıştı. Matematiksel fikirlerin, ekoloji uzmanları tarafından incelenecek türdeki sistemler bakımından gerçekçi olmadığını düşünüyordu. As-

lında tuhaf olan, ekoloji hakkındaki bildiklerinin May'in görüşünü değerlendirmeye yetecek kadar çok olmasıydı. Düşüncesine göre, bunlar tek boyutlu fonksiyonlardı - devamlı surette değişen sistemlerle ne ilişkileri olabilirdi ki? Meslektaşlarının biri de zaten öyle diyordu: "Lorenz'i oku." Bu tavsiyeyi bir kâğıt parçasının üzerine yazmış, bir daha da bakmak aklına gelmemişti.

Yıllar sonra Schaffer Arizona eyaletinde, Tucson şehrinin eteklerindeki çöllük arazide yaşadı;[21] yazlarını kuzeydeki Santa Catalina dağlarında geçiriyordu; çölün sıcaktan kavrulduğu günlerde, küçük adacıklar oluşturan çalılıklarla kaplı olan bu bölgede sıcaklık daha çekilir düzeylerde kalıyordu. Schaffer ve doktora öğrencileri, Haziran ve Temmuz aylarında ilkbahar çiçeklerinin açtığı ve daha yaz yağmurlarının gelmediği bir dönemde, çalılıkların ortasında, arıları ve değişik bitki türlerini izliyorlardı. Bu ekolojik sistem, yıldan yıla değişmeler göstermesine rağmen, ölçümü kolay bir sistemdi. Schaffer her yaprağa konan arıları sayıyor, pipetle çiçeklerin içini emerek poleni ölçüyor ve verilerin matematiksel analizini yapıyordu. Yaban arıları bal arılarıyla rekabet halindeydi; bal arıları da marangoz bal arılarıyla rekabet halindeydi; Schaffer ise popülasyondaki dalgalanmaları açıklayabilmek için inandırıcı bir model kurdu.

1980 yılı geldiğinde Schaffer bir şeylerin yanlış olduğunu anladı. Kurduğu model çalışmıyordu. Aslında, Schaffer modelde asıl rolü oynaması gereken bir türü, karıncaları göz ardı etmişti. Meslektaşlarının bazıları modelin çalışmayışını olağanüstü bir kış mevsimi geçirmiş olmalarına, bazıları da olağanüstü bir yaz geçirmiş olmalarına bağladı. Schaffer birkaç değişken daha ilave edip modelini komplike hale getirmeyi düşündü. Ancak tamamen hayal kırıklığına uğramıştı. Doktora öğrencileri arasında kulaktan kulağa, o yazı 1500 metre* yükseklikte Schaffer'le birlikte geçirmenin gayet zevksiz bir tecrübe olduğu sözü yayılmaya başlamıştı. Sonra her şey değişti.

*İngilizce metinde 5000 fit. (ç.n.)

Komplike bir laboratuvar deneyi dolayısıyla kimyasal kaosla ilgili olarak yazılmış bir makalenin müsvettesi tesadüfen Schaffer'in eline geçti; makaleyi yazanların geçirdiği tecrübenin tamamen aynı probleme ilişkin olduğunu hissetti: Bir kabın içindeki düzinelerle değişken reaksiyon ürünlerini kontrol etmenin imkânsızlığı, Arizona dağlarındaki düzinelerle hayvan türünü kontrol etmenin imkânsızlığına tıpatıp uyuyordu. Oysa, onlar başarmış, Schaffer ise başarısızlığa uğramıştı. Faz uzayını yeniden inşa etme konusunu okudu. Nihayet Lorenz'in, Yorke'un ve diğer bazılarının yazılarını okudu. Arizona Üniversitesi "Kaos içinde Düzen" konulu bir konferans dizisi düzenlemeyi kabul etti. Harry Swinney geldi; Swinney deneyler hakkında neler söyleneceğini iyi biliyordu. Kimyasal kaosu izah ederken, bir garip çekicinin görüntüsüne ilişkin bir slayt gösterdi ve "Bu veriler gerçektir," dedi; o anda Schaffer'in tüyleri diken diken olmuştu.

"Birdenbire benim kaderimin bu olduğunu anladım," dedi Schaffer. Ertesi yıl Üniversiteden izinli sayılacağı yıldı. National Science Foundation (Ulusal Bilim Kurumu) ödeneği için yaptığı müracaatı geri alıp, bir Guggenheim bursuna müracaat etti. Artık, dağların tepesinde karıncaların da mevsimle birlikte değiştiklerini biliyordu. Arılar çiçeklere konuyor ve dinamik bir vızıltıyla usarelerini emiyorlardı. Bulutlar gökte hızla kayıyordu. Schaffer'in çalışmasını eski tarzda sürdürmesi artık mümkün değildi.