

Keyifli Okumalar Dileriz

Binlerce kategoride milyonlarca PDF e-kitap, ders kitapları, dergiler ve romanlara platformumuz üzerinden ücretsiz ulaşabilirsiniz.

RESMİ WEB SİTEMİZ

<https://rantey.org>

Yedek ve Duyuru Kanallarımız

Sitemize erişim engeli gelmesi veya adres değişikliği durumunda aşağıdaki kanallardan güncel giriş adresine erişebilirsiniz:

- Telegram: <https://t.me/birkitapbir>
- WhatsApp Kanalımız : <https://whatsapp.com/channel/0029VbDHv8uE50Us4lvMoc0Y>

YAŞAMIN YÜKSELİŞİ

Evrimin On Büyük İcadı

"Charles Darwin mezarından fırlasaydı kendisine gelmesi için eline bu kitabı tutuştururdum." Matt Ridley

NICK LANE





NICK LANE

İngiliz biyokimyager ve yazardır. University Colllege London'da onursal öğretim üyesi ve Genetik, Evrim ve Çevre bölümünde Provost's Venture Research Fellow olarak çalışmaktadır. Lane'in çalışmaları evrimsel biyokimya ve bioenerji bilimi alanlarında, hayatın kökeni ve karmaşık hücrelerin evrimine odaklanmaktadır. Yazarın evrimsel biyokimya konusundaki üç kitabı dünya çapında 100.000'den fazla satmıştır: *Oxygen: The molecule that made the world*, *Power, Sex, Suicide: Mitochondria and the Meaning of Life*, *Life Ascending: The Ten Great Inventions of Evolution*.

Yaşamın Yükselişi
Evrimin On Büyük İcadı
Nick Lane

Özgün Künye
Life Ascending - The Ten Great Inventions of Evolution
Copyright © 2009, 2010, Nick Lane

AYLAK KITAP
© Her hakkı mahfuzdur.
Bu kitabın hakları Anatolia Telif Hakları Ajansı aracılığıyla satın alınmıştır.

Çeviri: Ebru Kılıç
Yayına Hazırlayan: Murat Gülsaçan
Düzeltili: G. Mine Olgun
Grafik Tasarım: Özge Kılıç

1. Baskı, Şubat 2014
Aylak Kitap: 38
ISBN: 978-605-5691-99-8

AYLAK KITAP
Caferaga Mh. Nailbey Sk.
Umut İşhanı No: 15
Daire: 8 Kadıköy / İstanbul
Tel: 0 216 345 40 69 (pbx)
Faks: 0 216 345 40 68
Sertifika No: 22806

Baskı
Deniz Ofset: Gümüşsuyu Cad. Odin İş Merkezi B Blok/403
Topkapı-İstanbul Tel: 0212 613 30 06
Sertifika No: 25001

www.aylakkitap.com
aylakkitap@aylakkitap.com

YAŞAMIN YÜKSELİŞİ

EVİRİMİN ON BÜYÜK İCADI

NICK LANE

Çeviren: Ebru Kılıç



Annem ve babama
Artık ben de bir babayım, benim için yaptıklarınızı
hiç olmadığı kadar takdir ediyorum.

İÇİNDEKİLER

	<i>Giriş</i>	7
1	Hayatın Kökeni	15
2	DNA	45
3	Fotosentez	75
4	Karmaşık Hücre	107
5	Seks	141
6	Hareket	173
7	Görme	203
8	Sıcakkanlılık	241
9	Bilinç	273
10	Ölüm	307
	<i>Sonsöz</i>	339
	<i>Notlar</i>	341
	<i>Resimler</i>	359
	<i>Teşekkürler</i>	363
	<i>Bibliografya</i>	367
	<i>Dizin</i>	379

GİRİŞ

Evrimin On Büyük İcadı



Uzayın her şeyi yutan karanlığının ortasında dünya, büyüleyici mavi-yeşil bir toptur. Gezegenimizi ay ve ötesinden görme hissini yaşayanların sayısı 20-25'i geçmez geçmesine, ama onların dünyaya gönderdikleri resimlerin kırılğan güzelliği bir kuşağın zihnine kazınmıştır. Hiçbir şey bu görüntülerin yerini tutamaz. İnsanların sınırlar ve petrol için yaptığı ucuz kavgalar ve açgözlülük, sonsuz bir boşlukla çevrili bu yaşayan mücevherin hepimizin evi olduğu, dahası, hayatın muhteşem icatlarıyla paylaştığımız, ve onlara borçlu olduğumuz bir ev olduğu bilgi-siyle dağılır gider.

Gezegenimizi, bir zamanlar genç bir yıldızın yörüngesinde dönüp duran, sürekli darbelere maruz kalan sert bir kaya parçası olmaktan çıkarıp uzaydan görünen o capcanlı deniz fenerine dönüştürmüş şey hayattır. Fotosentez yapan mini minnacık bakteriler hava ve deniz okyanuslarını temizleyip oksijenle doldururken gezegenimizi mavi ve yeşile çeviren şey hayattır. Hayat birdenbire canlanmış, hayal edilebilir bütün boyutlarda patlak vermiştir. Çiçekler açar, boyunlarını uzatır; dantel misali mercanlar hızla ileri atıveren Japon balıklarını saklar, derin karanlıklarda büyük canavarlar dolandır, ağaçlar gökyüzüne uzanır; hayvanlar vızıldar, hantal hantal yürür ve görür. Bütün bunların ortasında, bu yaratının anlatılmamış gizemleriyle kendimizden geçeriz: biz, yani hisseden ve düşünen, buraya nasıl geldiğimize hayret eden kozmik molekül toplulukları.

Gezegeneimizin tarihinde ilk kez, biz biliyoruz. Kesin bir bilgi değil bu, taş tabletler üzerine kazınmış bir hakikat de değil; insanın en büyük arayışının, çevremizde ve içimizde yaşayan dünyayı bilme ve anlama çabasının olgulaşan meyvesi. Genel hatları, bu satırları kaleme almamdan 149 yıl önce *Türlerin Kökeni* adlı kitabı yayınlanmış olan Darwin'den beri biliyoruz elbette. Darwin'den bu yana geçmiş hakkındaki bilgimiz sadece boşlukları dolduran fosillerle değil, genin derin yapısına ilişkin bir anlayışla, hayatın zengin dokusundaki her ilmeğin temelinde yatan bir anlayışla da zenginleşti. Hayatın daha yeni yeni çevirmeye başladığımız dillerde yazılmış olan, salt çevremizdeki dünyayı değil, uzak geçmişimizi anlamanın anahtarını da sunan canlı ve ayrıntılı bir hikayesini ortaya çıkarmaya, ancak son yıllarda, kuram ve soyut bilgidен hareket ederek başlayabildik.

Önümüze serilen bu hikaye herhangi bir yaratılış mitinden çok daha anlamlı, çok daha ikna edici, çok daha inceliklidir. Ama her yaratılış miti gibi, dönüşümlerin, hayret verici ani değişimlerin, geçmiş devrimlerin üzerinden geçerek yeni karmaşıklık katmanlarıyla gezegeneimizi yapılandıran yenilik patlamalarının hikayesidir. Gezegeneimizin çekişmelerle, dehayla ve değişimle dolu gerçek tarihi, uzaydan görünen sakin güzelliğini yalancı çıkarır. Ucuz, küçük çekişmelerimizin gezegeneimizin çalkantılı geçmişini yansıtıyor olması ve sadece bizim, dünyanın yağmacılarının bütün bunların üzerinde yükselip bütünün güzel birliğini görebilecek olmamız ne kadar ironik.

Gezegeneimizdeki bu altüst oluş, bir-iki avuç dolusu evrimsel yenilikle, dünyayı değiştiren ve nihayetinde bizim hayatlarımızı mümkün kılan icatlarla tetiklendi. İcattan ne kastettiğime açıklık getirmem gerek, çünkü bilinçli bir mucidi kastetmek istemiyorum. *Oxford İngilizce Sözlüğü*'nde icat, "Bir şeyi yapmanın önceden bilinmeyen yeni bir yöntemini ya da aracını ilk kez bulmak ya da üretmek; başlatmak, tanıtmak" olarak tanımlanıyor. Evrimin bir öngörüsü yoktur, geleceği planlamaz. Bir mucit, akıllı bir tasarım yoktur. Ama yine de doğal seçilim bütün özellikleri çok kesin testlere tabi tutar ve en iyi tasarımlar bu sınavları geçer. Doğal seçilim, insanlık tiyatrosunu küçülten, her

kuşakta trilyonlarca minicik farklılığı eşzamanlı olarak izleyen doğal bir laboratuvarıdır. Tasarım dört bir yanıımızdadır, kör, ama dahiyane süreçlerin ürünüdür. Evrimciler genellikle teklifsizce icat sözünü kullanırlar, ama doğanın hayret verici yaratıcılığını daha iyi ifade edecek başka bir sözcük de yoktur. Bütün bunların nasıl ortaya çıktığını kavrayabilmek, dinî inançları ne olursa olsun bütün bilim insanlarının ve nasıl olup da bu noktaya geldiğimize tutkuyla kafa yoran herkesin ortak hedefidir.

Bu kitap evrimin büyük icatları hakkındadır. Her büyük icadın canlı dünyayı nasıl değiştirdiği, biz insanların bu geçmişi, doğanın kendisine rakip çıkan bir dehayla okumayı nasıl öğrendiği hakkındadır. Hayatın muhteşem mucitliğini ve bizim muhteşem mucitliğimizi kutlayan bir çalışmadır. Gerçekten de elinizdeki kitap buraya nasıl geldiğimize dair o uzun hikayeyi, hayatın kökeninden kendi hayatlarımız ve ölümlerimize uzanan destansı yolculuktaki köşe taşlarını konu alıyor. Ölçeği büyük bir kitap. Hayatı, derin denizlerdeki menfezlerde başlayan kökeninden insan bilincine, minik bakterilerden devasa dinzorlara kadar enine boyuna katedeceğiz. Jeoloji ve kimyadan nöro-görüntülemeye, kuantum fizikinden gezegen bilimine bilimlerin içinden geçeceğiz. Kadim Gılgameş Destanı'ndan en son araştırmalara, tarihteki en ünlü bilim insanlarından bugün pek az bilinen, ama umarım bir gün ünlü olmaya yazgılı araştırmacılara insanlık tarihini katedeceğiz. İlk burada okuyun!

Sunduğum icat listesi elbette ki öznel, başka türlü de olabilirdi; ama ben, tercihlerimi hayatın tarihindeki birkaç önemli olayla sınırladığını düşündüğüm dört kriter kullandım.

İlk kriter, icadın yaşayan dünyada ve gezegenin tamamında bir devrim yaratmış olması gereğidir. Dünyayı, bildiğimiz aşırı yüklü, oksijen zengini gezegen haline getiren (onsuz hayvanların olamayacağı) fotosentezden daha önce bahsetmiştim. Diğer değişiklikler o kadar belirgin değil, ama neredeyse o kadar nüfuz edicidir. Sonuçları bakımından en nüfuz edici iki değişiklik, hayvanların yiyecek aramak için dolaşmasını mümkün kılan hareket ile bütün canlı organizmaların karakterini ve davranışlarını dönüştüren görme olmuştur. Gözlerin 540 milyon önceki hızlı

evrimi, Kambriyen patlamasına, bildiğimiz hayvanların fosil kayıtlarında birden belirmesine pekala hiç de küçümsenmeyecek bir katkıda bulunmuş olabilir. Her icadın dünyayı değiştiren sonuçlarını bölümlerin girişinde tartışıyorum.

İkinci kriterim, icadın bugün de her şeyin önüne geçen bir öneme sahip olması gereği. Buna verilebilecek en iyi örnekler cinsellik ve ölümdür. Cinsellik nihai varoluşsal saçmalık olarak tanımlanmıştır, bu da Kama Sutra'da öfke duymaktan mest olmaya uzanan o eğilip bükülmüş zihinsel duruşların değerini görmezden gelip sadece hücreler arasındaki cinselliğin kendine özgü mekanizmasına odaklanmak anlamına gelir. Neden birçok yaratık, hatta bitkiler sessiz sedasız kendilerinin kopyalarını klonlayacaklarına cinsellikle uğraşırlar sorusu artık cevaplamaya çok yaklaştığımız bir muammadır. Ama cinsellik nihai varoluşsal saçmalıkta, ölümün de nihai varolmayışsal saçmalık olması gerekir. Neden yaşıyor ve ölüyor, bu süre zarfında iç parçalayan ürkütücü hastalıklara maruz kalıyoruz? Bu en modern zihinsel meşgalemize termodinamik, kaos ve yozlaşmanın yükselmesi kanunları hükmetmez, çünkü bütün canlılar yaşlanmaz, yaşlananlar bile bir düğmeye basıp bu süreci durdurabilirler. Evrimin hayvanların ömrünü her zaman, kat be kat artırdığını göreceğiz. Yaşlanmaya karşı hapların bir mit olması gerekmiyor.

Üçüncü kriter, her icadın, örneğin kültürel evrimin değil, doğal seçimle evrimin doğrudan bir sonucu olmasıdır. Ben bir biyokimyagerim, dil ya da toplum hakkında söyleyecek orijinal bir şeyim yok. Ama başardığımız her şeyin altında, insani olan her şeyin altında bilinç yatıyor. Temelinde ortak değerler, algılar ya da hisler; sevgi, mutluluk, üzüntü, korku, özlem, umut ve inanç gibi söze dökülemeyen hisler olmayan ortak bir dil ya da toplum biçimi düşünmek zordur. Eğer insan zihni evrildiyse, beyni harekete geçiren sinirlerin ölümsüz bir ruh hissini, duyguların öznel yoğunluğunu nasıl doğurabildiğini de açıklamamız gerekir. Dokuzuncu bölümde gerekçelendirmeye çalışacağım üzere, hâlâ tartışmalı olsa da, bence bu biyolojik bir problemdir. Bu yüzden, bilinç büyük icatlardan biri olarak listeye "dahil" edilmiş; kültürel evrimin ürünleri olarak dil ve toplum dışarıda bırakılmıştır.

Son kriterim, icadın bir biçimde ikonlaşmış olması gereğidir. Gözün varsayılan mükemmelliği herhalde Darwin'den, hatta öncesinden beri örnek teşkil eden bir zorluk olmuştur. O zamandan bu yana göz birçok kere, birçok biçimde ele alınmıştır, ama son on yıl içindeki genetik kavrayışlar yeni bir çözüm sunuyor, hiç beklenmedik bir ataya dikkat çekiyor. DNA'nın çifte sarmalı, enformasyon çağımızın en büyük ikonu haline gelmiştir. Karmaşık hücrelerin ("ökaryotik hücre") kökeni ikonlaşmış başka bir konudur, ama alan dışından insanlardan çok bilim insanları arasında iyi bilinir. Bu köşe taşı son kırk yıldır evrimciler arasındaki en hararetli tartışma konularından biri olmuştur, karmaşık hayatın evrende ne kadar yaygın olabileceği sorusu açısından da kritik bir önem taşır. Her bölümde, bunun gibi ikonlaşmış meseleler ele alınıyor. Işın başında, listemi bir dostumla tartışmıştım, dostum bana hareket yerine, hayvanların simgesi olarak "bağırsakları" önermişti. Oysa bence bu fikir bir ikon olma statüsüne erişemiyor: Benim düşünceme göre en azından kas gücünün ikonik bir değeri var (uçmanın görkemini düşünmek bile yeter) kas gücüne dayanan hareket olmazsa, bağırsak dediğimiz şey bir deniz fiskiyesinden ibarettir, bir kayaya bağlanmış dalgalanan bağırsak sütunlarından yani. Hiç de ikonik değil.

Bu biçimsel kriterler dışında, her icadın benim hayal gücümü sarması gerekir. Bunlar, tutkuyla merak eden bir insan olarak anlamayı en fazla istediğim icatlardır. Bazıları hakkında daha önce yazmıştım, burada bunları daha etraflıca ele almak istedim; DNA gibi bazılarınınsa bütün meraklı zihinler için ölümcül bir cazibesi vardır. DNA'nın yapısının derinlerine gömülmüş ipuçlarının ortaya çıkarılması geçen yarım yüzyılın en büyük bilimsel dedektiflik hikayelerinden biri olmuştur, ama nedense bilim insanları arasında bile pek bilinmez. Umarım bu amansız takip sırasında duyduğum heyecanın bir bölümünü aktarmayı başarmışımdır. Sıcakkanlılık da ateşli tartışmaların yaşandığı alanlara bir başka örnektir, çünkü dinozorlar aslında sıcakkanlı katiller mi, yoksa tembel hayvan benzeri kertenkeleler midir, sıcakkanlı kuşlar doğrudan *T.rex*'in kuzenlerinden mi evrilmiştir yoksa dinozorlarla hiçbir ilgileri yok mudur gibi konularda hâlâ pek az

görüş birliği vardır. Kanıtları bir de benim değerlendirmem için bundan daha iyi bir fırsat bulabilir miydim acaba?

İşte elimizde böyle bir liste bulunuyor, umarım okumaya can atıyorsunuzdur. Hayatın kökeniyle başlıyor, DNA, fotosentez, karmaşık hücre, cinsellik, hareket, görme, sıcakkanlılık ve bilinç gibi zirvelerden geçerek ölümle ve ölümsüzlük imkanlarıyla bitiriyoruz.

Ama başlamadan önce, bu giriş bölümü boyunca arka planda akan tema, yani evrim tarihinin derinliklerine dair bu gibi kavrayışlar edinmemizi sağlayan yeni “diller” hakkında bir şeyler söylemek istiyorum. Çok kısa bir süre öncesine kadar, geçmişe uzanan iki büyük yol vardı: Fosiller ve genler. Her ikisi de geçmişe hayat üfleme konusunda muazzam güce sahiptir, ama her ikisinin de kusurları vardır. Fosil kayıtlarında varsayılan “boşluklar” epeyce söylenmiş bir şarkıdır, Darwin onlardan yana kaygılandığından beri geçen 150 yıl içinde bu boşlukların birçoğu çalışkanlıkla doldurulmuştur. Sorun şudur ki fosiller, tam da korunmalarını sağlayan koşullar yüzünden, geçmişe çarpık göstermeyen bir ayna tutamazlar, tutmazlar. Onlardan bu kadar çok şey çıkarabilmiş olmamız dikkat çekicidir. Benzer şekilde, gen dizilerinin ayrıntılarını karşılaştırabilmek, başka organizmalarla nasıl bir ilişkimiz olduğunu gösteren soyağaçları kurmamızı sağlar. Maalesef, genler sonunda artık hiçbir ortak noktaları olamayacak kadar farklılaşır: Belli bir noktadan sonra, genlerle okunulan geçmiş çarpılır. Ama genlerin ve fosillerin ötesine geçen, derin geçmişe uzanan güçlü yöntemler vardır; bu kitap biraz da bu yöntemlerin doğruluğuna bir övgüdür.

Size en beğendiklerimden, elinizdeki kitapta bahsetme fırsatı bulamadığım bir örnek vereyim. Hayat için çok merkezî bir önem taşıyan, bakterilerden insana kadar bütün canlı organizmalarda bulunan bir enzimle (kimyasal tepkimeleri hızlandıran bir protein) ilgili bu örnek. Bu enzim, biri çok sıcak hidrotermal menfezlerde, diğeri donmuş Antarktika’da yaşayan iki farklı bakteri türünden alınarak karşılaştırılmış. Bu enzimleri şifreleyen gen dizimleri farklıdır, o kadar farklılaşmışlardır ki artık basbayağı ayrı enzimlerdir. Biz bu enzimlerin ortak bir atadan

farklılaştıklarını biliyoruz, çünkü daha ılımlı koşullarda yaşayan bakterilerde bir ara biçim yelpazesi görüyoruz. Ne var ki tek başına gen dizilimlerinden yola çıkarak söyleyebileceğimiz daha fazla bir şey yok. Kesinlikle farklılaşmışlardır, çünkü hayat koşulları çok farklıdır, ama bu soyut, kuramsal bilgidir, kuru ve iki boyutludur.

Ama gelin şimdi bir anda yoğun bir X-ışını huzmesiyle delinen ve kristalografideki muhteşem ilerlemeler sayesinde şifresi çözülen bu iki enzimin moleküler yapılarına bir bakalım. İki yapı üst üste yerleştirilebilir, birbirlerine o kadar benzerler ki her kıvrım, her gedik, her oyuk, her çıkıntı bir diğerinde tamına kopyalanmıştır, hem de üç boyutta. Bilmeyen bir göz, aralarında bir fark göremez. Başka bir deyişle, zaman içinde çok sayıda yapı taşı yer değiştirmiş olsa da, molekülün genel şekli ve yapısı, dolayısıyla da işlevi evrim boyunca korunmuştur; sanki taştan yapılmış bir katedralmiş de sonra ana mimari kaybedilmeksizin tuğlalarla yeniden inşa edilmiş gibi. Sonra başka bir soru gözlerimizin önüne serilir. Hangi yapı taşları, neden değişmiştir? Çok sıcak menfezlerde yaşayan bakterilerde, bu enzim olabildiğince sağlamdır; yapı taşları birbirlerine çimento gibi iş gören iç bağlarla sıkı sıkıya bağlanmış, kaynayan menfezlerden gelen enerji darbelerine rağmen yapıyı korumuşlardır. Sürekli meydana gelen depremlere dayanacak şekilde inşa edilmiş bir katedraldir adeta. Buzda yaşayan bakteride ise durum tam tersidir. Bu enzimde yapı taşları esnektir, dondurucu soğuğa rağmen harekete imkan verir. Tuğla yerine bilyelerle yapılmış bir katedrale benzer bu enzim. İki enzimin 6°C'de etkinliklerini karşılaştırırsanız, buzdaki enzimin 29 kat daha hızlı olduğunu görürsünüz, ama 100°C'ye çıkarsanız bu enzim paramparça olur.

Ortaya çıkan tablo renkli, üç boyutlu bir tablodur. Gen dizilimindeki değişikliklerin artık bir anlamı vardır: Tümüyle farklı koşullarda işleme gereğine karşın enzimin yapısını, işlevini korumuşlardır. Artık evrim boyunca aslında neler olduğunu ve neden olduğunu görebiliyoruz, salt yaklaşık tahminlerde bulunmuyor, gerçek bir kavrayışa varıyoruz.

Şimdi elimizde bulunan başka akıllıca araçlara dayanarak aslında neler olduğuna dair benzer canlılıkta kavrayışlara ulaşabiliriz. Örneğin karşılaştırmalı genomik, sadece genleri değil, genomların tamamını, bir seferde yüzlerce farklı türe ait binlerce geni karşılaştırmamızı mümkün kılıyor; bu da ancak son birkaç yıl içinde, genom dizilimlerinin tamamının görülmesiyle mümkün oldu. Proteomik, herhangi bir anda bir hücrenin içinde işleyen protein yelpazesini görmemizi, bu yelpazenin çağlar boyunca süren evrim sırasında korunmuş az sayıda düzenleyici genle nasıl kontrol edildiğini kavramamızı sağlıyor. Hesaplamalı biyoloji, genlerdeki değişimlere rağmen proteinlerde varlığını sürdüren belli şekilleri ve yapıları, motifleri belirlememize yardımcı oluyor. Kayalar ya da fosillerin izotopik analizleri, atmosfer ve iklimde geçmişte yaşanmış değişimleri yeniden kurmamızı mümkün kılıyor. Görüntüleme teknikleri, düşündüğümüz sırada beyindeki nöronların işleyişini görmemizi ya da kayaların içine gömülmüş mikroskobik fosillerin üç boyutlu yapısını bozmaksızın yeniden kurmamızı sağlıyor, vesaire.

Bu tekniklerin hiçbiri de yeni değil. Yeni olan, incelik ve gelişmişlikleri, hızları ve erişilebilirlikleri. Belirlenen takvimden epeyce önce hızlanarak tırmanışa geçen İnsan Genomu Projesi'nde olduğu gibi, verilerin birikim hızı baş döndürücü. Bütün bu bilgiler, nüfus genetiği ve paleontolojinin klasik dilinde değil, moleküllerin dilinde, doğada değişimin fiilen gerçekleştiği düzeyde yazılı. Bu yeni tekniklerle birlikte, evrimin işleyişini gerçek zamanda yakalama becerisine sahip yeni bir evrimci türü doğuyor. Tablo böyle resmedildiğinde, ayrıntılarının zenginliğiyle, atom altı düzeyden gezegenler düzeyine uzanan ölçeğiyle gerçekten de nefes kesici. İşte bu yüzden, tarihte ilk kez bizim bildiğimizi söyledim. Genişlemekte olan bilgi dağarcığımızın büyük bölümü gelip geçici hiç kuşkusuz, ama canlı ve anlamlı. Bu devirde, bu kadar çok bildiğimiz, ama hâlâ daha fazlasını bilmeyi ipe çektiğimiz böyle bir zamanda yaşıyor olmak bir sevinç.

Hayatın Kökeni

Yerküre Dönüyordu...



Gündüz ve gece hızla birbirini takip ediyordu. O zamanlar dünyada bir gün sadece beş ya da altı saat sürüyor, gezegenimiz çılgınca kendi ekseninde dönüyordu. Ay gökyüzünde tehditkar bir biçimde asılıydı, bugün olduğundan çok daha yakındı, çok daha büyük görünüyordu. Yıldızlar pek parlamıyordu, çünkü atmosfer sis ve tozla doluydu, ama geceleyin gökyüzünde seyre değer kayan yıldızlar görünüyordu hep. Güneş, bütün o yoğun kırmızı sisten görülebilirse, sönük ve zayıfı, yetişkinliğin kuvvetinden yoksundu. İnsanlar burada yaşayamazdı. Gözlerimiz Mars'ta olabileceği gibi pörtleyip patlamazdı, ama ciğerlerimiz bir nefeslik oksijen bile bulamazdı. Çaresizce bir dakika çırpınır, sonra da boğulup giderdik.

“Yerküre” bu gezegen için iyi bir isim değildi. “Denizküre” daha iyi bir isim olurdu. Bugün bile okyanuslar gezegenimizin üçte ikisini kaplar, uzaydan alınan görüntülerde kendilerini gösterir. O zamanlarda dünyanın neredeyse tamamı suyla kaplıydı, birkaç küçük volkanik ada, dalgaların üzerinden başlarını uzatıyordu. Yukarıda asılı ayın esiri olan dalgalar devasaydı, onlarca metre yüksekliğindeydiler belki de. Göktaşları ve kuyrukluyıldızların etkisi daha önceleri, en büyükleri aydan kopup geldiği zamanlarda olduğu kadar sık hissedilmiyordu; ama nispeten

sakin olan bu dönemde bile okyanuslar sürekli kaynayıp köpürüyordu, bu kaynama derinlerde de sürüyordu. Yerkabuğu çatlaklarla doluydu, magma fışkırıp kaynıyordu, yanardağlar yeraltı dünyasının varlığını sürekli hissettiriyordu. Bir denge dünyasıydı bu, sürekli faaliyet halinde bir dünyaydı, hummalı bir bebek gezegendi.

Hayatın, 3 milyar 800 milyon yıl önce, gezegenin huzursuzluğundan bir şeylerin itkisiyle ortaya çıktığı bir dünyaydı. Bunu biliyoruz, çünkü o geçip gitmiş devirlerden kalma birkaç kaya kırıntısı o huzursuz çağları atlatıp bugüne kadar gelmiştir. Bu kaya parçacıklarının içlerinde, hayatın neredeyse şaşmaz damgası olan atomik bileşimi taşıyan minicik karbon zerrecikleri saklıdır. Devasa bir iddia için dayanıksız bir kanıt gibi görünebilir bu, belki de öyledir, uzmanlar arasında tam bir görüş birliği sağlanamamıştır. Ama zamanın kabuğundan birkaç katmanı daha kaldırıp 3 milyar 400 milyon yıl öncesine gittiğimizde, hayat emareleri su götürmez bir hal alır. O zamanlar dünya bakteri kaynıyordu. Bakteriler de izlerini sadece karbon imzası olarak değil, çok farklı biçimlerdeki mikrofosillerde, bakteri hayatının kubbeli katedrallerinde, bir metre uzunluğundaki stromatolitlerde bırakmışlardı. Fosil kayıtlarında gerçekten karmaşık ilk organizmaların ortaya çıkmasına kadar, bakteriler gezegenimize 2 milyar 500 milyon yıl boyunca hükmettiler. Bazıları gezegene hâlâ onların hakim olduğunu söyler, çünkü bitki ve hayvanların ısıltısı biyokütle bakımından bakterilerinkine denk değildir.

İnorganik unsurlara hayat üfleyen o ilk zamanların dünyasında ne vardı? Benzersiz miyiz, son derece nadir miyiz? Gezegenimiz evrene dağılmış bir katrilyon olasılıktan biri mi? Antropik ilkeye göre bunun pek önemi yoktur. Evrende hayat olasılığı bir katrilyonda birse, o zaman bir katrilyon gezegenden kesinlikle birinde hayatın ortaya çıkması gerekir. Kendimizi yaşayan bir gezegende bulduğumuzdan, bu gezegende yaşamamız gerektiği açıktır. Hayat ne kadar ender olursa olsun, sonsuz bir evrende her zaman hayatın bir tek gezegende ortaya çıkması ihtimali vardır, biz de o gezegende yaşıyor olsak gerektir.

Siz de benim gibi, fazlasıyla parlak istatistikleri tatmin edici bulmuyorsanız, işte size Fred Hoyle gibi tumturaklı bir bilim insanının, sonra da Francis Crick'in ileri sürdüğü, tatmin edicilikten uzak başka bir açıklama: Hayat başka bir yerde başlamış, ya tanrı benzeri, dünya dışı bir zeka tarafından ya da şans eseri gezegenimize "bulaştırılmıştır". Belki de öyle, kim öyle olmadığına bahse girebilir ki? Ama çoğu bilim insanı bu şekilde akıl yürütmekten haklı bir sebeple kaçınır. Bu iddia, aslında bilimin hayatın nasıl başladığı sorusunu cevaplayıp cevaplayamayacağını inceleme zahmetine girmeksizin, cevaplayamayacağını kabul etmek anlamına gelir. Kurtuluşu evrenin başka bir yerinde aramak için ileri sürülen her zamanki gerekçe zamandır: Dünyada geçen zaman, hayatın insanı sersemleten karmaşıklığının evrilmesi için yeterli değildir.

İyi de kim diyor bunu? Oysa aynı derecede önemli bir bilim insanı olan Nobel Ödüllü Christian de Duve tüyler ürpertici bir iddiayla, kimyanın belirlenimciliğinin hayatın çabucak ortaya çıkmış olması gerektiği anlamına geldiğini savunuyor. De Duve esasen, kimyasal tepkimelerin ya çok hızlı gerçekleşmesi gerektiğini ya da hiç gerçekleşmediklerini söylüyor. Bir tepkimenin tamamlanması bin yıl sürüyorsa, sürekli başka, hızlı tepkimelerle yenilenmiyorlarsa bu süre zarfında tepkimeye giren bütün maddelerin yok olması ya da bozulması ihtimali vardır. Hayatın kökenleri kesinlikle bir kimya meselesidir, bu yüzden de aynı mantık geçerlidir, hayatın temel tepkimeleri kendiliğinden ve çabucak gerçekleşmiş olmalıdır. Bu yüzden de Duve'a göre, hayatın on milyar değil de on bin yıl içinde ortaya çıkmış olması daha muhtemeldir.

Dünyada hayatın gerçekten nasıl başladığını asla bilemeyiz. Bir test tüpünün içinde kaynaşan kimyasallardan bakteriler ya da sürünerek çıkan böcekler yapmayı başarsak da, gezegenimizde hayatın gerçekten böyle mi başladığını asla bilemeyiz, sadece böyle şeylerin mümkün olduğunu, bir zamanlar düşündüğümüzden daha muhtemel olduğunu bilebiliriz. Ama bilim istisnalarla değil, kurallarla ilgilidir; gezegenimizde hayatın doğuşuna hükmeden

kuralların da evrenin tamamında geçerli olması gerekir. Hayatın kökeninin aranması MÖ 3 milyar 851 milyon yılı Perşembe sabahı 06.30'da neler olduğunu yeniden kurma yönünde bir girişim değildir, evrenin herhangi bir yerinde, özellikle de bizim gezegenimizde, bildiğimiz tek örnekte herhangi bir hayatın doğuşuna hükmetmesi gereken genel kuralları ortaya çıkarmaya yönelik bir girişimdir. Bu bölüm bu kurallarla ilgilidir. İzini süreceğimiz hikayenin her ayrıntısının doğru olmadığı neredeyse kesin olsa da, ben bu hikayenin büyük ölçüde akla yatkın olduğu kanısındayım. Hayatın kökeninin bazen ileri sürüldüğü gibi büyük bir gizem olmadığını, yerkürenin dönmesi yüzünden, hayatın neredeyse kaçınılmaz olarak doğduğunu göstermek istiyorum.



Bilim sadece kurallarla ilgili değildir elbette ki, kuralları doğrulayan deneylerle de ilgilidir. Hikayemiz, Kraliçe II. Elizabeth'in taç giydiği, Everest'in zirvesine çıkıldığı, Stalin'in öldüğü, DNA'nın açığa çıktığı ve hayatın kökeni araştırmalarının sembolik kökeni olan Miller-Urey deneyinin yapıldığı 1953'te, *annus mirabilis*'te (mucizeler yılında) başlıyor.* Stanley Miller o tarihte, Nobel Ödüllü Harold Urey'in laboratuvarında sıkı bir doktora öğrencisiydi; 2007'de herhalde biraz içerlemiş bir halde göçüp gitti, öldüğünde yarım yüzyıldır ileri sürdüğü görüşler uğruna hâlâ mücadele ediyordu. Fikirlerinin akıbeti ne olursa olsun, Miller'ın asıl mirası, dikkat çekici deneyleri sayesinde kurduğu alan oldu, bu deneylerin sonuçları bugün hâlâ hayret uyandıracak güçtedir. İşte bu yüzden bu hikayeyi bir kez daha anlatmaya değer.

Miller büyük bir cam şişeyi su ve bir gaz karışımıyla doldurmuştu, dünya atmosferinin ilk bileşimi olduğunu düşündüğü şeyi ortaya çıkarmayı amaçlıyordu. Miller'ın seçtiği gazların Jüpiter'in atmosferini oluşturduğuna inanılıyordu (spektroskopi yoluyla), ayrıca akla yatkın bir varsayımla genç dünyada da

* O yıl ayrıca, *Playboy* dergisi yayın hayatına başlamış, James Bond ilk kez *Casino Royale*'le kitap sayfalarından fırlamıştı. Ayrı bir rüzgar esiyordu herhalde.

amonyak, metan ve hidrojenin de bol bulunduğu sanılıyordu. Miller yıldırımları simüle ederek bu karışıma elektrik kıvılcımları verdi ve beklemeye başladı. Birkaç gün, birkaç hafta ve birkaç ay sonra numuneleri alıp tam olarak neler pişirdiğini görmek için analiz etti. Bulguları, en uçuk hayallerini bile aşıyordu.

İlksel bir çorba, handiyse efsanevi bir organik moleküller karışımı pişiriyordu, bunlar arasında proteinlerin yapı taşı olan, DNA'nın meşhur olması öncesinde o tarihlerde kuşkusuz hayatın en sembolik molekülleri arasında sayılan birkaç amino asit de vardı. Daha da çarpıcı olan şey şuydu: Miller'ın çorbasında oluşan amino asitler, geniş bir potansiyel yapılar rezervuarından rastgele seçilmiş amino asitler değildi, hayatın kullandığı amino asitlerin aynlarıydı. Başka bir deyişle, Miller basit bir gaz karışımına elektrik vermiş, bu karışımda hayatın temel yapı taşları pelteleşmişti. Var olmaya çağrılmayı bekliyorlarmış gibi. Birdenbire hayatın kökeninin bulunması kolay görünmüştü. Bu fikir dönemin ruhundan bir şeyleri yakalamış olmalı, çünkü bu hikaye *Time* dergisinin kapagina çıkmıştı, bilimsel bir deney için görülmemiş bir tanıtım dalgasıydı bu.

Ama gel zaman git zaman, ilksel bir çorba fikri cazibesini yitirdi. Kadim kayalara ilişkin analizler dünyanın hiçbir zaman metan, amonyak ve hidrojen bakımından zengin olmadığını, en azından ayda tozu dumana katan büyük göktaşı bombardımanı sonrasında beri durumun böyle olduğunu açıkça ortaya koyduğunda, bu fikrin alinyazısı da dip noktaya indi. Bu büyük bombardıman, gezegenimizin ilk atmosferini ortadan kaldırmış, onu uzaya süpürmüştü. İlk atmosfere ilişkin daha gerçekçi simülasyonlar da hayal kırıklığı yarattı. Eser miktarda metan ve başka gazların da bulunduğu bir karbondioksit ve azot karışımına elektrik vermeyi deneyin, elde ettiğiniz organik moleküllerin miktarı keder verici bir şekilde düşer. Nadiren bir amino asit görülebilir. İlksel çorba, laboratuvarı basit yöntemlerle organik moleküller yapılabileceğini gösteren hoş bir deney olsa da, bir tuhaflik olmaktan öteye geçemedi.

Ne var ki uzayda, en başta da asteroidler ve meteorlarda bol

miktarda organik molekülün tespit edilmesi ilksel çorba fikrini kurtardı. Bu asteroitler ve meteorların birkaçının neredeyse tamamen kirli buz ve organik moleküllerden oluştuğu görülüyordu. Ayrıca bu gökcisimleri, gazlara elektirik verilmesiyle oluşan amino asitlerle dikkat çekici bir benzerlik gösteren bir amino asit çeşitliliği sergiliyordu. Varlıklarının şaşırtıcı bir olgu olması bir yana, hayat moleküllerini, devasa bir koleksiyon olan olası tüm organik moleküllerin küçük bir alt kümesini özellikle kayıran bir şey varmış gibi görünüyordu. Büyük asteroit bombardımanı artık hayli farklı bir yüze bürünmüştü: Salt yıkıcı olmaktan çıkmış, hayatın ortaya çıkabilmesi için gerekli bütün suyun ve organik moleküllerin nihai kaynağı haline gelmişti. Çorba dünyaya özgü değildi, dış uzaydan gelmişti. Çoğu organik molekül çarpmaların etkisiyle yok olsa da, hesaplamalar yeterli sayıda molekülün çarpışmadan kurtulup bir çorba yaratabileceğini gösteriyordu.

Kozmolog Fred Hoyle tarafından savunulan, hayat tohumunun uzaydan geldiği fikrine pek benzemese de, bu fikir hayatın ya da en azından ilksel çorbanın kökenlerini evrenin dokusuna bağlıyordu. Hayat artık tek başına bir istisna değil, kütleçekim kadar kaçınılmaz, büyük bir kozmolojik sabitti. Söylemeye bile gerek yok, astrobiyologlar bu fikre bayıldılar. Birçoğu hâlâ bayılır. Hoş bir fikir olması bir yana, onlara iş güvencesi de sağlar.

Ilksel çorba, moleküler genetiğin de çok hoşuna gider, özellikle de hayatın tümüyle kopyalayıcılarla, en başta da kendi kendilerini sadakatle kopyalayıp sonraki kuşaklara aktarabilen DNA veya RNA'dan oluşan genlerle ilgili olduğu fikri çok sevilir. (Sonraki bölümde bu konudan daha fazla bahsedeceğiz.) Doğal seçilimin bir tür kopyalayıcı olmadan işleyemeyeceği kesinlikle doğrudur, hayatın *ancak* doğal seçilimin kanatları altında karmaşıklık geliştirebileceği de aynı ölçüde doğrudur. Birçok moleküler biyoloğa göre, bu durumda hayatın kökeni, kopyalamanın *kökenidir*. Bir çorba da bu fikre gayet güzel uyar, görünüşe bakılırsa, birbirlerine rakip kopyalayıcıların gelişip evrilmesi için gerekli bütün bileşenleri sunar. Şöyle güzel koyuca bir

çorbada, kopyalayıcılar ihtiyaçları olan şeyleri alır, daha uzun, daha karmaşık polimerler oluşturur, nihayet diğer moleküllerin proteinler ve hücreler gibi daha ayrıntılı yapılar inşa etmelerini sağlarlar. Bu bakış açısına göre, çorba harflerle dolu, doğal seçilimin onları yakalamasını ve üstün bir nesire dökmesini bekleyen alfabetik bir denizdir.

Bütün bunlara rağmen çorba fikri, tehlikeli bir fikirdir. İlle de yanlış olmasından ileri gelmez bu tehlike, çünkü başta iddia edilenden daha sulu da olsa, bir zamanlar ilksel bir çorba olması gerçekten de mümkündür. Tehlikeli bir fikirdir, çünkü onlarca yıl boyunca dikkatleri hayatın asıl temellerinden uzaklaştırmıştır. Sterilize edilmiş şöyle koca bir kase çorba alın (ya da fındık ezmesi) bir milyon yıl boyunca öylece bırakın. Hayat oluşur mu? Hayır. Neden? Çünkü kendi haline bırakılan içerik bozulmaktan başka bir şey yapmaz. Kaseye tekrar tekrar elektirik verseniz de durum düzelmez, çünkü çorba daha hızlı bozulur. Şimşek gibi sık rastlanan büyük bir elektiriklenme birkaç yapışkan molekülün bir araya gelip topluluklar oluşturmasını sağlayabilir, ama onları parçalarına ayırması çok daha muhtemeldir. Böyle bir elektiriklenme, bir çorbada sofistike bir kopyalayıcı nüfusu yaratabilir mi? Kuşkuluyum. Arkansas yolcusuna dendiği gibi, "Oraya buradan gidilmez". Bir cesedin tekrar tekrar elektirik verilerek hayata döndürülememesiyle aynı nedenler yüzünden, termodinamik olarak akla yatkın değildir.

"Termodinamik", popüler olma iddiasındaki bir kitapta kaçınılsa çok iyi edilecek sözcüklerden biridir, ama olduğu gibi görülürse kitabı daha eğlenceli kılar: "Arzu" bilimidir termodinamik. Atomların ve moleküllerin varoluşuna "itmeler", "çekmeler", "istemeler", "boşalmalar" hükmeder, o kadar ki şehvetli bir tür insansılık katmaksızın kimya hakkında bir şeyler yazmak imkansız hale gelir. Moleküller elektron kaybetmek ya da kazanmak "ister"; karşıt yükler birbirini çeker, benzer yükler iter ya da benzer nitelikteki moleküller birlikte olur. Tüm molekül eşler katılmayı istediklerinde kimyasal bir tepkime kendiliğinden meydana gelir ya da daha büyük bir kuvvetin baskısıyla isteme-

den tepkimeye girerler. Ve tabii bazı moleküller gerçekten tepkimeye girmek ister, ama içten gelen utangaçlıklarını aşmakta zorlanır. Hafif, nazik bir flört muazzam bir şehvetin salınmasına, saf bir enerji boşalımına yol açabilir. Eh, herhalde burada dursam iyi olur.

Demek istediğim şu: Termodinamik dünyayı döndürür. İki molekül birlikte tepkimeye girmek istemiyorlarsa, girmeye öyle kolayca ikna edilemezler; yok istiyorlarsa, utangaçlıklarını aşmaları biraz zaman alsa da gireceklerdir. Hayatlarımızı bu türden istekler yönlendirir. Besinlerdeki moleküller oksijenle tepkimeye girmek isterler, hem de çok, ama talihe bakın ki kendiliğinden tepkimeye giremezler (biraz utangaçtırlar), yoksa hepimiz alev alırdık. Ama hayatın kıvılcımı, hepimizi ayakta tutan, yavaş yavaş devam eden o içten yanma tam da bu tip bir tepkimedir: Besinden koparılan hidrojen, oksijenle tepkimeye girer ve yaşamak için ihtiyacımız olan *bütün* enerjiyi salar.¹ En dipte, bütün hayat benzer tipte “temel bir tepkime”yle ayakta durur: Gerçekleşmek isteyen ve gerçekleştiğinde metabolizmayı oluşturan bütün yan tepkimelere güç sağlamakta kullanılabilecek enerjiyi salan kimyasal bir tepkime. Bütün bu enerji, bütün hayatlarımız birbirleriyle tümüyle dengesiz iki molekülün yan yana gelmesinden ibarettir: hidrojen ve oksijenin. Mutlu bir moleküler birleşmeyle bir araya gelen bu iki karşıt molekül, üretken bir enerji boşalması yaşar, birleşmelerinden geriye küçük, sıcak bir su birikintisinden başka bir şey kalmaz.

İlksel çorbadaki sorun da budur: Çorba termodinamik bakımdan ölüdür. Çorbadaki hiçbir şey özellikle tepkimeye girmeyi istemez, en azından hidrojen ile oksijenin tepkimeye girmeyi istediği gibi. Hayatı yukarıya, daha yukarıya, o çok dik enerji tepesini tırmanıp proteinler, lipidler, polisakkaridler ve özellikle de RNA ile DNA gibi gerçekten karmaşık polimerlerin oluşumuna yönlendirecek hiçbir dengesizlik yoktur. RNA gibi kopyalayıcıların termodinamik itici bir güçten önce gelen ilk hayat parçacıkları olduğu fikri, Mike Russell’ın sözleriyle, “bir otomobilin motorunu çıkarıp düzenleyici bilgisayarın arabayı sürme-

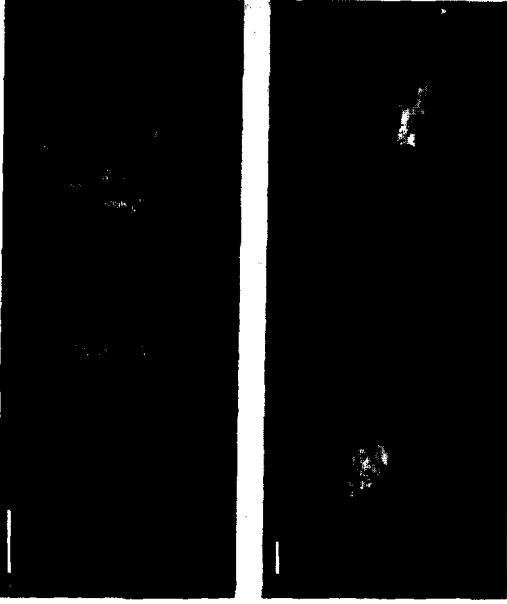
sini beklemeye benzer". Peki ama hayatın motoru bir çorbadan gelmediyse nereden gelmiştir?



Bu soruya verilebilecek bir cevabın ilk ipucu, 1970'lerde, Galapagos Adaları'ndan pek uzakta olmayan Galapagos Yarığı'ndan yükselen sıcak su dumanlarının fark edilmesiyle ortaya çıktı. Bir zamanlar zenginlikleriyle Darwin'in zihnine türlerin kökeninin tohumunu atan bu adalar, şimdi de hayatın kökeni için bir ipucu sunuyordu.

Birkaç yıl boyunca pek bir şey olmadı. Sonra 1977'de, Neil Armstrong'un aya ayak basmasından sekiz yıl sonra, ABD Donanması'na ait Alvin denizaltısı yarığa inerek sıcak su dumanlarının çıkmasına yol açabilecek okyanus altı hidrotermal menfezleri aradı ve beklendiği üzere buldu. Gelgelelim bunların varlığı pek şaşırtıcı olmasa da, yarığın zifiri karanlıktaki derinlerinde düpedüz bir hayat bolluğuyla karşılaşılması tam bir şok oldu. Burada yemek tabağı kadar büyük midye ve deniztaraklarıyla karışık, bazıları iki metre uzunluğunda olan dev boru kurtçukları (*raftia pachyptila*'lar) vardı. Okyanusların derinliklerinde dev hayvanlara rastlamak olağandışı değildi belki (dev mürekkepbalıklarını düşünelim) ama bolluk göstermeleri hayret vericiydi. Derin deniz menfezlerindeki nüfus yoğunluğu, güneş yerine menfezlerin püskürmeleriyle beslense de yağmur ormanları ve mercan resiflerindeki nüfus yoğunluğuna rakip olabilirdi.

Herhalde bütün bunların en dramatik yönü, menfezlerin kendisiydi, kısa süre sonra bunlara "kara bacalar" ismi takıldı (Şekil 1.1). Galapagos Yarığı menfezleri, o zamandan bu yana keşfedilen, Pasifik, Atlantik ve Hint Okyanuslarının tabanındaki dağ sıralarına dağılmış 200 menfezin yanında sönük kalır. Bazıları gökdelen kadar yüksek kara baca kuleleri, yukarıdaki okyanuslara doğru yükselen kara dumanlar pompalar. Bu duman gerçek duman değildir, aşağıdaki magma ocağından çıkıp deniz suyunu işgal eden, çok sıcak, sirke kadar asitli, soğuk sulara varmadan önce okyanusun derinindeki ezici basınç ortamında



Şekil 1.1 Kuzey Pasifik Okyanusu'nda Juan de Fuca sırtında, 350 derece ısıyla gaz püskürten volkanik bir kara baca. Bacayı belirten kulenin yüksekliği bir metredir.

Şekil 1.2 Doğa Kule; Kayıp Kent'te, yılankavi bir dip kayadan yükselen 30 metre yüksekliğinde faal bir alkalin menfezi. Faal olarak gaz püskürten bölgeler açık renkli görülür. Menfezi imleyen yükselti bir metredir.

400°C gibi sıcaklıklara ulaşan metal sülfattır. Bacaların kendileri, kara dumandan çökelen, geniş alanlarda yoğun birikintiler halinde toplanmış demir piritler (budala altını) gibi sülfür minerallerinden oluşur. Bazı bacalar günde 30 cm gibi hayret verici bir hızla yükselir, çökmeden önce 60 metre gibi bir yüksekliğe ulaşabilir.

Bu tuhaf ve yalıtılmış dünya, bacalardan salınan hidrojen sülfür gazının pis kokusu ve kükürtle doluymuş gibi görünür, sanki Hieronymus Bosch'un rahatsız zihninden çıkmış bir Cehennem tablosudur. Hiç kuşkusuz sadece Bosch, ağzı ya da anüsü olmayan devasa *raftia pachyptila*'ları, bacaların altındaki çıkıntılarda bir çekirge istilasına kadar korkunç, bir kalabalık halinde yaşayan gözsüz karidesleri düşünebilirdi. Bacalardaki hayat bu cehennem koşullarına tahammül etmekle kalmaz, o koşullar olmadan devam edemez, onlarla yaşar. Ama nasıl?

Bu sorunun cevabı dengesizlikte yatar. Deniz suyu kara bacaların altındaki magmaya doğru sızdığı anda aşırı ısınır ve başta hidrojen sülfür (sülfürik asit) olmak üzere mineraller ve gazlarla

dolar. Sülfür bakterileri bu karışımdan hidrojen alabilir ve bu hidrojeni karbondioksit bağlayarak organik maddeyi oluşturabilir. Bu tepkime menfezlerdeki hayatın temelidir, bakterilerin güneşten doğrudan gelen bir şey olmaksızın serpilip gelişmelerini mümkün kılar. Ama karbondioksitin organik maddeye çevrilmesi enerjiye mal olur ve bu enerjinin bulunması için de sülfür bakterilerinin oksijene ihtiyacı vardır. Hidrojen sülfürün oksijenle tepkimeye girmesi, menfez dünyasını besleyen enerjiyi salar ve bizim hayatlarımızı besleyen hidrojen ve oksijen tepkimesinin eşdeğeridir. Bu tepkimenin ürünleri (daha önceki tepkimede olduğu gibi) su, ama aynı zamanda element halindeki sülfür, yani Kitab-ı Mukaddes'te adı geçen, sülfür bakterilerine adını veren kükürttür.

Menfez bakterilerinin, saldıkları hidrojen sülfür dışında menfezin ısısına ya da başka bir yönüne doğrudan hiçbir yararlarının olmadığını belirtmek gerekir.² Hidrojen sülfür gazı enerji bakımından zengin değildir, enerjiyi ortaya çıkaran şey gazın oksijenle tepkimeye girmesidir, bu da menfezler ile okyanuslar arasındaki *arayüze* dayanır, iki dünyanın dinamik bir dengesizlik içinde yan yana olmasına. Yalnızca bu menfezlerin yakınlarında yaşayan, aynı anda her iki dünyadan da yararlanabilen bakteriler bu tepkimeleri gerçekleştirebilir. Menfez hayvanları, örneğin menfez karidesi bakterilerden oluşan bu mantolarla beslenir ya da bir çiftlik sahibiymiş gibi içinde bakteri besler. Bu da, örneğin dev boru kurtçuklarının bir sindirim sistemine neden ihtiyaç duymadıklarını açıklar: İhtiyaç duymazlar, çünkü bakteri sürüleriyle içten beslenirler. Ne var ki hem hidrojen sülfür hem oksijen sağlama zorunluluğu, ev sahibi hayvanların karşısına bazı ilginç ikilemler çıkarır, çünkü iki dünyanın *birlikteliğini* küçük ölçekte içlerinde kurlmaları gerekir. Boru kurtçuklarının ilginç anatomilerinin büyük bölümü bu katı yükümlülüğünden kaynaklanır.

Çok geçmeden, menfez dünyasındaki hayat koşulları, hayatın kökeni üzerine düşünen bilim insanlarının da dikkatini çekmiştir, menfez dünyasıyla ilk ilgilenen bilim insanı Seattle'da Washington Üniversitesi'nde görevli okyanusbilimci John Ba-

ross olmuştur. Menfezler ilksel çorbayla ilgili birçok sorunu, en belirgin olarak da termodinamik sorununu hemen çözüyorlardı; kara kara püsküren dumanda dengeden eser yoktu. Bununla birlikte, dünyanın ilk zamanlarında okyanuslar ile menfezler arasındaki arayüz biraz farklı olabilirdi, çünkü o zamanlar oksijen ya çok azdı ya da hiç yoktu. İtici güç, bugün solunumda olduğu gibi, hidrojen sülfürün oksijenle tepkimeye girmesi olamazdı. Her halükarda, hücresel solunum karmaşık bir süreçtir, evrilmesi zaman almış olsa gerektir, bu nedenle ilksel enerji kaynağı olamaz. Tabuları deviren Alman kimyageri ve patent avukatı Günter Wächtershäuser'a göre hayatın ilk motoru, hidrojen sülfürün demirle tepkimeye girip budala altını olarak bilinen mineral demir piritleri oluşturmaya; kendiliğinden gerçekleşen, en azından prensipte, yakalanabilecek miktarda enerji salan bir tepkimedir bu.

Wächtershäuser hayatın kökeni hakkında, başka hiçbir şeye benzemeyen bir kimyasal tablo ortaya koydu. Piritlerin oluşumu sırasında salınan enerji, karbondioksiti organik maddeye çevirmeye yetecek miktarda değildi, bu yüzden de Wächtershäuser karbonmonoksitin tepkimeye daha hazır bir aracı olabileceğini düşündü. Bu gaz gerçekten de asitli menfezlerde tespit edilmiştir. Wächtershäuser tuhaf bir katalize etme güçleri varmış gibi görünen çeşitli demir-sülfür minerallerini de ağır gelişen başka organik tepkimeler düşünüp ileri sürdü. Bir kez daha, Wächtershäuser ile meslektaşları bu kuramsal tepkimelerin birçoğunu laboratuvar ortamında gerçekleştirmeyi, bunların sırf akla yatkın olmanın ötesine geçtiğini kanıtlamayı başardılar. Hayatın nasıl başlamış olabileceğine ilişkin yıllanmış fikirleri tersine çeviren, cehennemsi bir ortamda hidrojen sülfür, karbonmonoksit ve demir piritlerinden, yani iki zehirli gaz ve budala altını gibi en beklenmedik bileşenlerle şapkadan hayat çıkarıveren bir güç gösterisiydi. Bir bilim insanı Wächtershäuser'ın çalışmasını ilk okuduğunda, bir zaman tüneliyle yirmi birinci yüzyılın sonundan çıkıp geliveren bilimsel bir makaleye rastlamış gibi hissettığını söylemişti.

Peki ama Wächtershäuser haklı mıydı? Kısmen uzun zamandır aziz tutulan fikirleri tersine çeviren gerçek bir devrimci olduğu için, kısmen kendini beğenmiş tavırları başka bilim insanlarının tepesini attırdığı için, kısmen de resmettiği tablo meşru bir takım kuşkular doğurduğu için Wächtershäuser'a da acımasız eleştiriler yöneltildi. Bu tablonun en zorlayıcı kusuru, çorba fikrine de musallat olan "derişim problemi"ydi. Organik moleküllerin koca bir okyanus kadar suda çözülmesi gerekiyordu, bu yüzden de birbirleriyle karşılaşmaları ve RNA ile DNA gibi polimerler oluşturmaları son derece ihtimal dışıydı. Onları kapsayacak, içine alacak bir şey yoktu. Wächtershäuser bütün bu eleştirilere, bu tepkimelerin demir piritler gibi minerallerin yüzeyinde gerçekleşebileceğini söyleyerek karşı koydu. Ama bunda da bir zorluk vardı, o da nihai ürünler katalizörün yüzeyinden salınmıyorsa tepkimelerin sona ermeyeceğiydi. Böyle bir durumda her şey ya yapışır kalır ya da dağılırdı.³

Bugün Pasadena'da Jet İtici Laboratuvarı'nda (Jet Propulsion Laboratory) çalışan Mike Russell 1980'lerin ortasında bütün bu problemlere bir çözüm önerdi. Russell bazen bana JB Priestley'nin Dylan Thomas betimlemesini hatırlatır: Fal taşı gibi açılmış gözleriyle puslu tepelerden inip anlaşılmaz ama aydınlatıcı şiirler okuyan gerçek bir Kelt ozanı. Russell da "jeoşiirler" okumaya yatkındır, hayatla ilgili görüşleri termodinamik ve jeokimyaya dayanır, birçok biyokimyager de onu anlaşılmaz bulur. Ama Russell'ın fikirleri yıllar içinde, onun bakış açısında hayatın kökenine dair işleyebilir tek çözümü gören ve giderek kalabalıklaşan bir destekçi grubu çekmiştir.

Wächtershäuser da Russell da hidrotermal menfezlerin hayatın kökeni açısından temel bir önem taşıdığına hemfikirdi, ama onun ötesinde birinin ak dediğine öbürü kara diyordu; biri volkanik hareketleri ileri sürüyordu, öbürü onun antitezini; biri asitleri tercih ediyordu, öbürü bazları. Zaman zaman birbiriyle karıştırılan iki fikir olarak, ortak noktaları dikkat çekici derecede azdır. Açıklayayım.



Kara bacaların bulunduğu okyanus sırtları, yayılmakta olan yeni deniz tabanının kaynaklarıdır. Yükselen magma, bu volkanik faaliyet merkezlerinden yavaşça, bitişik tektonik levhaları ayrılmaya zorlar, levhalar uzayan tırnaklar gibi sürünme hızıyla birbirinden ayrılır. Bu sürünen levhalar, uzaklarda birbirleriyle çarpıştıklarında bir levha öbürünün altına girmek zorunda kalır, öbürüyse taş kıvrımlar halini alır. Himalayalar, And Dağları, Alp Dağları hepsi de tektonik levhaların bu şekilde çarpışması sonucu kabarmıştır. Ama yeni yerkabuğunun deniz tabanındaki yavaş hareketi mantodan çıkan yeni kayalar, yerkabuğunun altındaki tabakayı da açığa çıkarır. Bu gibi kayalar, kara bacalardan çok farklı ikinci tip bir hidrotermal menfeze yol açar, Russell'in savunduğu menfez tipi de budur.

İkinci menfez tipi volkanik değildir, işe magma da karışmaz. Bu tip menfezler yeni ortaya çıkmış kayaların deniz suyuyla tepkimesine dayanır. Su bu kayaların içine sızmakla kalmaz, fiziksel olarak onlarla tepkimeye girer, onlara dahil olur, yapılarını değiştirerek serpantin, yani yılan taşı (yılanın alacalı yeşil pullarına benzemesi nedeniyle bu ad verilmiştir) gibi hidroksit mineralleri oluşturmalarına yol açar. Deniz suyuyla tepkimeye girmesi kayayı genişletir, çatlamasına ve parçalanmasına yol açar, bu da daha fazla deniz suyunun kayaya girmesine, süreci devam ettirmesine neden olur. Bu gibi tepkimelerin hızı hayret vericidir. Kayalara bu şekilde bağlanmış suyun hacminin, okyanusların hacmine eşit olduğu sanılmaktadır. Okyanus tabanı genişledikçe, bu genişlemiş, su dolu kayalar nihayetinde çarpışan bir levhanın altına girerler, burada mantonun içinde yeniden aşırı ısınırlar. Bu sefer sularını bırakmaya, dünyanın bağırsaklarına salmaya başlarlar. Deniz suyuyla bu kirlenme magmanın derininde ısı aktaran dolaşımı yönetir, magmayı okyanus ortası sırtları ve yanardağların yüzeyinde yeniden yüzeye çıkmaya zorlar. Yani gezegenimizin çalkantılı volkanik hayatı büyük ölçüde deniz suyunun manto içinde sürekli hareket etmesiyle yürür. Dünyamızın denge durumuna ulaşması-

na engel olan şey budur. Yerküremizin dönmesi budur.⁴

Ama deniz suyunun manto kökenli kayalarla tepkimeye girmesi, gezegenimizin huzursuz volkanik faaliyetlerini yönlendirmekten fazlasını yapar, bol miktarda hidrojen gibi gazlarla birlikte, ısı şeklinde enerji de salar. Aslına bakarsanız bu tepkime, çirkince şişmiş görüntüler yansıtan sihirli bir çarpıtma aynasıymış gibi deniz suyunda çözülen her şeyin şeklini bozar, tepkimeye giren her şey elektronlarla yüklenir. (Teknik terimle, bunların “indirgendiği” söylenir.) Deniz suyu çoğunlukla su olduğu için salınan başlıca gaz hidrojendir, Stanley Miller’ın karışımını hatırlatan başka gazlardan da az miktarda bulunur, bunlar proteinler ve DNA gibi karmaşık moleküllerin öncüllerini yaratmakta çok yararlıdır. Böylece karbondioksit metana, azot amonyaga dönüşür, sülfatsa hidrojen sülfür püskürtür.

Isı ve gazlar yüzeye geri döner, burada ikinci tip hidrotermal menfez olarak ortaya çıkarlar. Bu menfezler hemen hemen her ayrıntılarıyla kara bacalardan farklıdır. Asitli olmaktan uzak olan bu menfezler hayli kuvvetli baz özellikleri gösterir. Isıları ılık ya da sıcaktır, ama aşırı sıcak kara bacaların ısısının epeyce altındadır. Genellikle okyanus ortasındaki sırtlardan, deniz tabanının yeni yeni yayılmasının kaynağından biraz uzakta bulunurlar. İçinden kara dumanın püskürdüğü tek bir deliği olan dikey kara bacalar yerine, minik baloncuklar ve bölümlerle dolu karmaşık yapılar oluşturmaya meylederler, ılık baz hidrotermal sıvılar yukarıdaki soğuk okyanus sularına karıştıkça bu yapılar çökeler. Sanırım bu tip menfezleri sadece pek az kişinin duymuş olmasının nedeni “yılan taşına dönme” (serpantinleşme, yılan taşı mineralinden hareketle) teriminin iticiliğidir. Buradaki amaçlarımız gereği, “kara bacalar”ın kuvvetinin yanında biraz yumuşak kaçsa da, onlara sadece “baz menfezler” diyelim. “Baz” sözcüğünün tam anlamını birazdan göreceğiz.

İlginçtir, kısa süre öncesine kadar baz menfezler prensip itibarıyla tahmin ediliyordu, ama sadece birkaç fosil rezervinden biliniyorlardı. En ünlüleri, İrlanda’daki Tynagh yaklaşık 350 milyon yaşındadır ve Mike Russell’ın 1980’lerde derin düşün-

celere kapılmasına yol açmıştır. Russell fosilleşmiş menfezin yakınından alınmış üstleri baloncuklu kayalardan ince kesitleri bir elektron mikroskobunda incelediğinde bu küçük bölmelerin organik hücrelerle aynı boyutlarda olduğunu (çapı bir milimetrenin onda biri kadar ya da daha az) ve labirenti andıran ağlarla birbirlerine bağlandığını görmüştü. Baz menfez sıvılarının asitli okyanus suları ile karışması halinde benzer mineral hücrelerinin de oluşabileceği varsayımında bulunmuş, kısa süre sonra da bazıları asitleri karıştırarak laboratuvar ortamında gözenekli kayaç yapılar üretmeyi başarmıştı. Russell 1988'de *Nature*'da yayınlanan bir makalesinde, baz menfezlerdeki koşulların buraları hayat için ideal bir yuva haline getirdiğine dikkat çekmişti. Bölmeler organik moleküllerin yoğunlaşması için doğal bir ortam hazırlıyordu, bölmelerin makinavit (mackinawite) gibi demir-sülfür minerallerinden oluşan duvarları, bu mineral hücreleri Günter Wächtershäuser'in hayal ettiği katalitik özelliklerle donatıyordu. Russell ve meslektaşları 1994'te kaleme aldıkları bir makalede şunu ileri sürmüşlerdi:

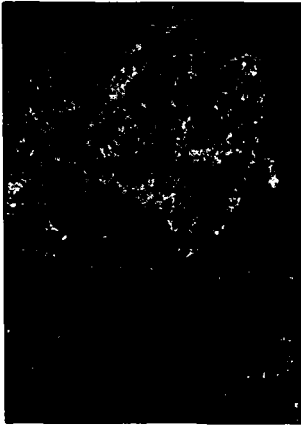
Hayat, bazik ve son derece indirgenmiş hidrotermal çözelti içeren demir-sülfür baloncuklarının oluşturduğu giderek büyüyen topluluklardan doğmuştur. Bu baloncuklar dört milyar yıl önce okyanus tabanının yayılma merkezlerinden biraz uzakta bulunan, deniz altındaki sülfürlü sıcak kaynaklarda hidrostatik olarak şişmiştir.

Bu sözcükler hayalciydi, çünkü o sıralarda derin denizlerde böyle yaşayan bir baz menfez sistemi keşfedilmemişti. Ama sonra yeni binyılın başında, *Atlantis* denizaltısındaki bilim insanları, orta Atlantik sırtının 15 km ötesinde, *Atlantis* dağı kitlesi denilen bir denizaltı dağının üstünde tam da bu tip bir menfeze rastladılar. Efsanevi kente atfen kaçınılmaz olarak Kayıp Kent adı verilen bu menfez, zifiri karanlığa doğru yükselen beyaz hassas sütunları ve karbonat parmaklarıyla ismini ürkütücü bir şekilde haklı çıkarır. Menfez alanı bu zamana kadar keşfedilmişlere hiç benzemez. Bazı bacalar kara bacalar kadar uzundur, Poseidon

adı verilen en uzununu 60 metre yüksekliğindedir. Ama kaba saba yapılar olmaktan çok uzak bu hassas sütunlar gotik mimari gibi süslüdürler, John Julius Norwich'in deyişiyle, "dalgın dalgın yapılmış karalamalar"la doludurlar. Burada hidrotermal salımlar renksizdir, buranın aniden terk edildiği, bu incelikli gotik görkemin her zaman korunduğu izlenimi doğar. Kara bacalarda olduğu gibi cehennemsi bir deliğin bulunmadığı bu menfez, taşlaşmış parmaklarıyla göğe doğru uzanan beyaz, kırılğan bir dumansızlık ortamıdır. (Şekil 1.2)

Görünmez olabilirler, ama salımlar gerçektir ve yaşayan bir kenti ayakta tutmaya yeterlidir. Bacalar demir-sülfür minerallerinden oluşmaz (oksijen zengini okyanuslarda pek demir çözülmez; Russell'in tahminleri çok daha önceki tarihlerle ilgilidir), ama yapıları yine de gözeneklidir, tüysü aragonit duvarlarla dolu, mikroskobik bölmelerden oluşan labirentlerdir (Şekil 1.3). İlginçtir, sükunete bürünmüş, hidrotermal sıvıların köpürmediği eski yapılar çok daha katıdır, gözenekleri kalsitle dolmuştur. Oysa yaşayan menfezler gerçekten de canlıdır, gözenekleri canla başla devam eden, kimyasal dengesizliğin tam anlamıyla kullanıldığı bir bakteri faaliyeti kovanıdır. Buralarda çeşitlilik bakımından kara bacalara rakip çıkan, ama boyutları bakımından kara bacalardaki canlıların çok gerisinde kalan hayvanlar da vardır. Öyle görünüyor ki bu boyut farkının sebebi ekolojidir, kara bacalarda serpilip gelişen sülfür bakterileri, onlara ev sahipliği yapan, içlerinde yaşadıkları hayvanların hayatına uyum sağlamaya hazırdır, Kayıp Kent'teki bakteriler (ya da daha kesin bir terimle *archae*) bu gibi ortaklıklar kurmaz.⁵ İç "çiftlikleri" olmayan menfez hayvanları da etkili bir büyüme gösteremez.

Kayıp Kent'te hayat, hidrojenin karbondioksitle girdiği tepkimeye bağlıdır, aslında gezegenimizde bütün hayatın temelinde bu tepkime vardır. Kayıp Kent'te, olağandışı bir biçimde bu tepkime doğrudandır, pratikte başka bütün durumlardaysa dolaylıdır. Yerden gaz olarak baloncuklar halinde gelen ham hidrojen, gezegenimizdeki ender lütuflardan biridir, hayat normalde, suda ya da hidrojen sülfürde olduğu gibi, başka atomlarla sıkı



Şekil 1.3 Bir alkalın menfezinin mikroskopik yapısı, hayatın kökeni için ideal bir yuva oluşturan, kendi aralarında iç bağlantıları olan bölümler görülüyor. Bu kesit yaklaşık bir santimetre genişliğinde ve 30 mikron kalınlığındadır.

bir moleküler ilişki içindeki gizli hidrojen kaynaklarını aramak zorundadır. Hidrojeni bu gibi moleküllerden koparmak ve karbondioksitle bağlamak enerjiye mal olur ve bu enerji de nihayetinde fotosentezle güneşten gelir ya da menfez dünyasında kimyasal dengesizliğin kullanılmasıyla sağlanır. Ancak ve ancak hidrojen gazı örneğinde tepkime, acı verecek kadar ağır olsa da, kendiliğinden gerçekleşir. Ama termodinamik bir bakış açısıyla yaklaşıldığında bu tepkime (Everett Shock'un unutulmaz sözlüyle) yemeniz için size para ödenen bedava yemektir. Başka bir deyişle, bu tepkime doğrudan organik moleküller yaratır ve bir seferde prensipte başka organik tepkimeleri beslemek için kullanılabilecek kadar ciddi miktarda enerji salar.

Bu yüzden Russell'ın baz menfezleri bir hayat üretme çiftliği olarak gerekli koşulları karşılar. Yerkürenin yüzeyini altüst eden, gezegenimizin dur durak bilmez volkanik faaliyetlerini teşvik eden bir sistemin ayrılmaz parçasıdırlar. Okyanuslarla sürekli bir dengesizlik içindedirler, baloncuklar halinde sürekli hidrojen salarlar ve hidrojen de karbondioksitle tepkimeye girerek organik moleküller oluşturur. Oluşan organik molekülleri tutan ve yoğunlaştıran, RNA gibi polimer topluluklarının oluşumunu çok daha mümkün kılan (sonraki bölümde bunu göreceğiz) bir gözenekli bölmeler labirenti oluştururlar. Uzun ömürlüdürler, Kayıp Kent'teki bacalar 40.000 yılı aşkın bir süredir menfez ha-

lindedirler, çoğu kara bacadan yüz kat daha uzun ömürlüdürler. Dünyanın ilk zamanlarında, soğuyan mantonun okyanuslarda daha doğrudan bir temas halinde olduğu dönemlerde sayıca daha da fazlaydılar. O günlerde de, okyanuslar çözölmüş demirle doluydu, mikro bölmelerinde İrlanda Tynagh'daki fosilleşmiş oyuklar gibi demir-sülfür minerallerinden oluşmuş katalitik duvarları olsa gerekti. Ashına bakarsanız, termal ve elektrokimyasal bileşenlerin tepkimeye girebilecek sıvıları katalitik bölmelerde dolaştırdığı doğal akış reaktörleri gibi işliyordı.

Bütün bunlar iyidir, güzeldir, ama ne kadar değerli olursa olsun tek bir reaktörün hayatı oluşturması pek mümkün değildir. Hayatın nasıl böyle doğal reaktörlerden çıkıp çevremizde gördüğümüz karmaşık, muhteşem yenilik ve deha dokusuna dönüştüğünü sorabilirsiniz. Cevap elbette ki bilinmiyor, ama hayatın özelliklerinden, özellikle de bugün dünya üzerindeki hayatın neredeyse tamamında ortak olan, derinlerde korunmuş bir tepkimeler iç çekirdeğinden çıkarılan ipuçları bulunuyor. Canlı bir iç fosil olan bu çekirdek metabolizma, çok uzak geçmişin yankılarını, bazik bir hidrotermal menfezdeki ilksel kökenleri seslendiren yankıları korur.



Hayatın kökenine yaklaşmanın iki yolu vardır: "Aşağıdan yukarıya" ve "yukarıdan aşağıya". Şimdiye kadar bu bölümde "aşağıdan yukarıya" yaklaşımını benimsedik, dünyanın ilk zamanlarının var olması çok muhtemel jeokimyasal koşullarını ve termodinamik bileşenlerini değerlendirdik. Hayatın kökeninin ortaya çıkması en muhtemel ortam olarak, derin denizlerde bulunan, hidrojen gazının karbondioksit doymuş bir okyanusa baloncuklar halinde çıktığı sıcak hidrotermal menfezlerle karşılaştık. Doğal elektrokimyasal reaktörler hem organik moleküller hem enerji üretme kapasitesine sahip olabilirler, ama tam olarak ne gibi tepkimelerin gerçekleşmiş olabileceğini ya da bu tepkimelerin bildiğimiz biçimiyle hayata nasıl yol açmış olabileceğini henüz değerlendirmedik.

Hayatın nasıl ortaya çıkabildiğine ilişkin tek gerçek kılavuz, bugün bildiğimiz biçimiyle hayattır, yani “yukarıdan aşağıya” yaklaşımıdır. Son Evrensel Ortak Ata’nın (Last Universal Common Ancestor/sevimli bir tabirle LUCA olarak bilinir) varsayımsal özelliklerini yeniden kurmak için, bütün canlılarda ortak olan özelliklerin bir listesini çıkarabiliriz. Bu yüzden, örneğin, ancak küçük bir bakteri alt kümesi fotosentez yapabildiğinden, LUCA’nın fotosentez yapabiliyor olması ihtimal dışıdır. LUCA fotosentez yapabiliyor idiyse, soyundan gelenlerin büyük çoğunluğu değerli bir beceriyi terk etmişler demektir; LUCA’nın fotosentez yapması ihtimalini tam bir kesinlikle dışarıda bırakmasak bile, en iyi ihtimalle imkansız görüldüğünü söyleyebiliriz. Oysa tersine, dünya üzerindeki hayat ortak özellikler gösterir: Bütün canlılar (hücreler içinde faaliyet gösterebilen virüsler dışında) hücrelerden oluşur, hepsinin DNA’dan oluşan genleri vardır, hepsi de belli amino asitler için genel bir şifre sayesinde proteinleri şifreler. Bütün canlıların, hücredeki her tür işin bedelini “ödeme” yetisine sahip (İleride bundan biraz daha bahsedeceğiz) bir tür banknot gibi işleyen, ATP (adenosin trifosfat) olarak bilinen ortak bir enerji birimi vardır. Bütün canlıların ortak özelliklerini bu uzak atadan, LUCA’dan aldığını akla yatkın bir şekilde çıkarsayabiliriz.

Bugün hayatın tamamı, kalbinde Krebs döngüsü olarak bilinen küçük bir tepkimeler zincirinin yattığı, ortak bir metabolik tepkimeler çekirdeğini paylaşır. Krebs döngüsü, 1930’larda Nazilerden kaçtıktan sonra Sheffield’da bu döngünün varlığını ortaya çıkaran Nobel Ödüllü Alman Sir Hans Krebs’in adını taşır. Bu döngü biyokimyada kutsal bir yere sahiptir, ama kuşaklar boyunca öğrencilere sınav zamanlarında öğrenilip sonra da unuttulan beterin beteri tozlu kadim tarih gibi gelmiştir. Korkmayın! Döngüyü oluşturan “trikarboksilik” asitlerin isimleri bizi ilgilendirmiyor.

Ama Krebs döngüsünde ikonik bir şeyler vardır. Biyokimya bölümlerinin darmadağın bürolarının (masanın üstünde, yerlere ve bir on yıldır boşaltılmamış çöp kutusuna doğru uzanan kitap

ve kağıt yığınlarının bulunduğu türden büroların) duvarlarına asılmış bu rengi solmuş grafikte genellikle ucu kıvrılan metabolik bir şema görürsünüz. Profesörün gelmesini beklerken hayranlık ve dehşet dolu bakışlarla süzersiniz bu grafiği. Karmaşıklığı sarıdır, bir delinin hazırladığı metro haritasına benzer, her yöne uzanan, sonra birbirlerinin çevresini sarmalayan küçük küçük oklar vardır. Solmuş olsa da bu okların farklı yolları renklerle belirttiklerini çıkarırsınız, proteinler kırmızı, lipidler yeşildir vs. Aşağıya doğru, bu oklar isyanının merkezindeymiş hissi verircesine küçük, dar bir çember karşınıza çıkar, herhalde haritanın tamamında rastladığınız tek çemberdir, hatta haritanın tek düzenli parçasıdır bu. İşte bu odur: Krebs döngüsü. Baktıkça haritadaki neredeyse bütün okların, tıpkı ezilmiş bir tekerleğin çubukları gibi bir şekilde Krebs döngüsünden çıktığını anlamaya başlarsınız. O, hücrenin metabolik çekirdeği ve herşeyin merkezidir.

Krebs döngüsü artık o kadar da tozlu gelmiyor. Son tıbbi araştırmalar bu döngünün hücrenin biyokimyası kadar fizyolojisinin de kalbinde olduğunu göstermiştir. Döngünün dönme hızındaki değişiklikler, yaşlanmadan kansere ve enerji durumuna kadar her şeyi etkiler. Ama bir o kadar büyük bir şaşkınlık yaratan şey, Krebs döngüsünün tersine dönebilmesidir. Normalde döngü (besinlerden) organik molekülleri alır ve (solunum sırasında oksijenle birlikte yanmaya yazgılı) hidrojen ve karbondioksit verir. Krebs döngüsü böylece sadece metabolik yolların öncüllerini sağlamakla kalmaz, ATP olarak enerji üretmek için gerekli küçük hidrojen paketleri de hazırlar. Tersine işlediğindeyse aksini yapar: Karbondioksit ve hidrojen alarak yeni organik moleküller, hayatın bütün temel yapı taşlarını üretir. Döngü tersine döndüğünde enerji salmak yerine ATP tüketir. ATP, karbondioksit ve hidrojen verdiğinizde döngü, sanki büyü yapıyor-muş gibi hayatın bütün temel yapı taşlarını çıkarır.

Krebs döngüsünün bu tersine dönüşü, bakterilerde bile yaygın değildir, ama hidrotermal menfezlerde yaşayan bakterilerde nispeten yaygındır. Bu döngü karbondioksiti hayatın yapı taşlarına çevirmenin ilkel olsa da açıkça önemli bir yoldur. Şu

sıralar Virginia, Fairfax'ta bulunan Krasnow İleri Araştırmalar Enstitüsü'nde çalışmalarını sürdüren Yale mezunu öncü biyokimyager Harold Morowitz ters Krebs döngüsünün özelliklerini didik didik incelemektedir. Kabaca ifade edecek olursak, Morowitz'in vardığı sonuç bütün bileşenler yeterli yoğunlukta verildiğinde döngünün kendi kendisine işleyeceğidir. Kova kimyasıdır bu. Bir aracının yoğunluğu arttığında, sıradaki aracıya dönüşme eğilimi gösterir. Olası bütün organik moleküller arasında en istikrarlılar ve oluşma ihtimali en yüksek olanlar Krebs döngüsünde yer alan organik moleküllerdir. Başka bir deyişle, Krebs döngüsünü genler "icat etmemiştir", olasılıkçı kimyaya ve termodinamiğe dayalı bir meseledir bu. Genler daha sonra evrildiklerinde, zaten var olan bir besteyi icra etmişlerdir, tıpkı bir orkestra şefinin bir eserin yorumundan, temposundan, inceliklerinden sorumlu olması, ama müziğin kendisini yaratmamış olması gibi. Müzik hep vardı, kürelerin müziği.

Krebs döngüsü dönmeye başladığında ve bir enerji kaynağına sahip olduğunda, amino asitler ve nükleotitler gibi daha karmaşık öncüleri doğuran yan tepkimeler neredeyse kaçınılmazdır. Dünya üzerindeki hayatın kilit metabolizmasının ne kadarının kendiliğinden doğduğu, ne kadarının sonraki genler ve proteinlerin ürünü olduğu ilginç, bu kitabın kapsamını aşan bir sorudur. Ama genel bir noktayı belirtmek istiyorum. Hayatın bu yapı taşlarını sentezleme yönündeki girişimlerin büyük çoğunluğu fazla "pürist" (saflık yanlısı) olmuştur. Bildiğimiz biçimiyle hayatın kimyasıyla hiçbir ilgisi olmayan, aslında onu lanetleyen siyanür gibi basit moleküllerle başlarlar, sonra basınç, ısı, elektrik yükleri gibi tümüyle biyoloji dışı parametrelerle oynayarak hayatın yapı taşlarını sentezleme girişiminde bulunurlar. Peki Mike Russell'ın ileri sürdüğü gibi ideal bir elektrokimyasal reaktörde Krebs döngüsündeki moleküller ve biraz ATP'yle yola çıktığınızda ne olur? Ucu kıvrık metabolik grafigimizin ne kadarı, termodinamik olarak en muhtemel moleküllerle aşağıdan yavaş yavaş dolan göksel bir kalıpla bu bileşenlerden kendiliğinden doğar? Epeyce bir kısmının, belki de küçük proteinler (daha

kesin olursak polipeptitler) ve RNA düzeyine kadar, buradan doğduğunu sanmakta yalnız değilim. O düzeyden sonra, doğal seçim dizginleri ele almaya başlar.

Bütün bunlar deney meselesidir, bu deneylerin de çoğu henüz yapılmamıştır. Bu tablonun gerçekçi olabilmesi için de sihirli bileşen, ATP'nin sürekli üretimine ihtiyacımız var. Bu noktada boyumuzu aştığımızı, yürümeyi öğrenmeden koşmaya çalıştığımızı düşünebiliriz. ATP'yi nasıl üretiriz? En ikna edici bulduğum cevap, Düsseldorf Üniversitesi'nde botanik profesörü olmak için ABD'den vazgeçmiş parlak, hatta sıklıkla açıksözlü Amerikalı biyokimyager Bill Martin'den geliyor. Martin, biyoloji açısından önemli hemen her şeyin kökeni konusunda bitmek bilmez bir yenilikçi fikirler kaynağı olmuştur. Bazı fikirleri yanlış olabilir, ama Martin her zaman heyecan vericidir, neredeyse her zaman biyolojinin farklı bir bakış açısıyla görülmesini sağlar. Martin bundan birkaç yıl önce Mike Russell'la bir araya gelmiş, ikili jeokimyadan biyokimyaya geçiş meselesine yüklenmişti. O zamandan beri de fikirler havada uçuşuyor. Biz de uçalım onlarla.



Martin ve Russell temellere dönmüşlerdi: organik dünyaya karbon akışına. Bugün, bitkiler ve bakterilerin hidrojen ve karbondioksiti canlı dünyaya dahil ederek organik madde üretmesinin sadece dört metabolik yolu olduğuna, bunlardan birinin de biraz önce gördüğümüz gibi Krebs döngüsü olduğuna dikkat çektiler. Bu dört yoldan üçünde ATP tüketilir (Krebs döngüsünde olduğu gibi), bu yüzden bunlar ancak bir enerji girdisi varsa gerçekleşebilirler. Ama dördüncü yol, hidrojenin doğrudan karbondioksitle tepkimeye girmesi organik moleküller üretmekle kalmaz, enerji de açığa çıkarır. İki grup antik organizma, kabaca benzer bir dizi adımla tam olarak bunu yapar. Bu gruplardan biriyle daha önce karşılaşmıştık: Kayıp Kent menfez alanında yaşayan "archaea" (arkea, arkeler, arkebakteriler).

Martin ve Russell haklılarsa, arkelerin uzak ataları 4 milyar yıl önce, hayatın şafağında hemen hemen benzer bir ortamda

aynı tepkimeler dizisini gerçekleştiriyorlardı. Ama hidrojenin karbondioksitle tepkimeye girmesi o kadar da doğrudan değildir, çünkü bu iki molekül kendiliğinden tepkimeye girmez, biraz “utangaçtırlar”, bir katalizörün onları dansa kalkmaya ikna etmesi gerekir, ayrıca işleri yoluna koymak için küçük bir enerji girdisine de ihtiyaçları vardır. Ancak bundan sonra ikisi bir araya gelebilir, bunu yaparken de biraz daha fazla enerji salarlar. Katalizör yeterince basittir. Bu tepkimeyi bugün hızlandıran enzimlerin çekirdeklerinde, menfezlerde bulunan bir mineralin yapısına çok benzer yapıda küçük demir, nikel ve sülfür toplulukları bulunur. Bu da ilk hücrelerin o zamanlar ortamda mevcut bir katalizörü kullandığını düşündürüyor, bu özellik bu yolun çok eski olduğunu işaret ediyor, çünkü sofistike proteinlerin evrimini gerektirmemiştir. Martin ve Russell’ın belirttiği üzere, bu yolun kökenleri taşlık, kayalıktır.

Öyle anlaşıyor ki tepkimenin başlaması için gerekli enerji kaynağı, en azından menfez dünyasında, menfezlerin kendileriydi. Beklenmedik bir tepkime ürünü onların bu düşüncesini yalancı çıkardı: *Acetyl thioester* (asetil tiyoester) olarak bilinen, tepkimeye giren bir sirke biçimi.⁶ Asetil tiyoesterler oluşur, çünkü karbondioksit çok kararlıdır ve hidrojenin saldırısına direnir, ama menfezlerde bulunan, tepkimeye girmeye daha hazır “serbest radikal” karbon ve sülfür parçalarına karşı daha savunmasızdır. Aslına bakarsanız, karbondioksiti hidrojenle tepkimeye girmeye ikna etmek için gerekli enerji, tepkimeye hazır serbest radikaller biçiminde menfezlerin kendilerinden gelir, bunlar da asetil tiyoester oluşumuna yol açar.

Asetil tiyoester önemlidir, çünkü metabolizmada, bugün organizmalarda hâlâ rastlanan kadim bir dallanma noktasında bulunur. Karbondioksit bir asetil tiyoesterle tepkimeye girdiğinde, daha karmaşık organik moleküllerin oluşumuna yol açan bir dal açılır. Bu tepkime kendiliğinden gerçekleşir ve enerji salar, sonunda da pirüvat denilen üç karbonlu bir molekül ortaya çıkarır; biyokimyagerin silkinip kendisine gelmesine yol açacak bir isimdir bu, çünkü Krebs döngüsüne giriş noktasıdır. Başka

bir deyişle, hepsi de termodinamik açıdan elverişli birkaç basit tepkime ve çekirdeklerinde onları “kaya kökenli” kılan mineral benzeri topluluklar bulunan enzimlerin hızlandırdığı birkaç tepkime, işte bunlar, bizi başka bir şeye gerek kalmaksızın doğruca hayatın metabolik kalbine Krebs döngüsüne götürür. Krebs döngüsüne adımımızı attığımızda da döngünün başlaması ve hayatın yapı taşlarını üretmesi için ihtiyacımız olan tek şey sürekli bir ATP kaynağıdır.

İşte çatalın öbür ucunda da ihtiyaç duyulan bu enerji, fosfatın bir başka asetil tiyoester ile tepkimeye girmesiyle üretilir. Kabul etmek gerekir ki bu tepkime ATP üretmez, ama ATP’nin asetil fosfat denilen daha basit bir biçimini üretir. Öyle bile olsa, asetil fosfat büyük ölçüde aynı amaca hizmet eder ve bugün bazı bakteriler ATP’nin yanı sıra hâlâ asetil fosfat kullanmaktadır. Asetil fosfat ATP’yle tam olarak aynı şeyi yapar, tepkimeye hazır fosfat grubunu başka moleküllere aktarır ve onlara onları harekete geçiren türden bir enerji verir. Bu süreç biraz çocukların ebelemece oyununu andırır, hani çocukların biri “ebe”dir ve ikinci bir çocuğa dokunmalı, böylece onu “ebe” yapmalıdır. “Ebe” olan çocuk, bir sonraki çocuğa geçirmek üzere bir “tepkimeye hazır olma” özelliği kazanır. Bir molekülden diğerine fosfat aktarımı büyük ölçüde aynı şekilde işler: Tepkimeye hazır olma etiketi, aksi takdirde harekete geçmeyecek molekülleri aktif hale getirir. İşte ATP, Krebs döngüsünü bu şekilde tersine çevirebilir, asetil fosfat da tam olarak aynı şeyi yapar. Tepkimeye hazır fosfat etiketi aktarıldığında, kalan, bugünkü bakterilerin yaygın bir ürünü olan sirke olur. Bir dahaki sefere ekşimiş (sirkeleşmiş) bir şişe şarap açtığımızda şişenin içinde işbaşındaki bakterileri bir düşünün, hayatın kendisi kadar eski bir atık ürün yaratıyorlar; en iyi hasattan daha saygın bir atık.

Bütün bunları bir araya getiren bazik hidrotermal menfezler sürekli asetil tiyoester üretir, böylece hem daha karmaşık organik moleküllerin oluşturulması hem onları oluşturmak için gerekli enerji için bugün hücrelerde kullanılan esasen aynı biçimde paketlenmiş bir başlangıç noktası yaratırlar. Bacaları dol-

duran mineral hücreleri hem ürünleri yoğunlaştırmanın, hem de bu gibi tepkimeleri elverişli kilmanın yollarını ve bu aşamada karmaşık proteinlere gerek olmaksızın bu süreci hızlandırmak için gerekli katalizörleri hazırlar. Son olarak hidrojen ve başka gazların mineral hücreler labirentine dolması, bütün hammadde-lerin sürekli yenilenmesi ve iyice karışmasını sağlar. Her yere nüfuz eden sonuçları olan küçük bir ayrıntı dışında, tam bir hayat pınarıdır bu.

Bu ayrıntı, bu sorun, hidrojen ve karbondioksitin arasını bulmak için en başta gerekli az miktarda enerjiyle ilgilidir. Bunun menfezlerde sorun olmadığını söylemiştim, çünkü hidrotermal koşullar, işleri yoluna koyan, tepkimeye hazır serbest radikaller oluştururlar. Ama menfezlerde yaşamayan serbest canlı hücreler için bu bir sorundur. Onların işleri yoluna koymak için ATP harcamaları gerekir, ilk buluşmada buzları eritmek için bir içki ısmarlamak gibi. Peki bunda ne sorun var? Bir muhasebe meselesidir. Hidrojenin karbondioksitle tepkimeye girmesi bir molekül ATP oluşturmaya yetecek kadar enerji salar. Ama bir ATP üretmek için bir ATP harcamanız gerekiyorsa, o zaman net bir kazanç yoktur. Net bir kazanç yoksa Krebs döngüsü de dönemez ve karmaşık organik moleküller oluşamaz. Hayat menfezlerde başlamış olabilir, ama asla kesilemeyecek bir tür termodinamik göbek bağıyla ebediyen menfezlere bağlı kalması gerekirdi.

Besbelli ki hayat menfezlere bağlı değildir. Bütün bu anlatı tam bir uydurmaca değilse, bundan nasıl kurtulabiliriz? Martin ve Russell'ın öne sürdüğü cevap muhteşemdir, çünkü bugün hayatın hemen hemen tamamının enerji üretmek için son derece tuhaf bir yöntemle, herhalde tüm biyolojide sezgilere en ters düşen mekanizmayla solunum yaptığını açıklar.



Otostopçunun Galaksi Rehberi'nde modern insanların beceriksiz ataları yeryüzüne gelirler ve burada yaşayan maymun insanın ayakta durmasını sağlarlar. Tekerleği yeniden icat etmek için bir alt komisyon kurarlar, yasal para olarak yaprağı kabul ederler, böylece

herkes muazzam zengin olur. Ama enflasyon yüzünden ciddi bir sorunla karşılaşılır, bir fıstık tanesi almak için yaprak döken ağaçlardan üç orman ödemek gerekiyordur. Böylece atalarımız kapsamlı bir deflasyon (yapraksızlaştırma) programı başlatır ve eh, bütün ormanları yakarlar. Bütün bunlar korkunç derecede akla yatkın geliyor.

Şakayı bir yana bırakırsak, sanırım bu paranın niteliğiyle ilgili ciddi bir meseleye parmak basıyor, değeri çıpalayacak hiçbir şey yoktur. Bir fıstık bir altın külçesine, bir peniye ya da yaprak döken üç ormana mal olabilir, bütün bunlar görelî değerlendirilmeye, az bulunmaya vs. bağlıdır. 10 liralık bir banknot neye mal olmak istiyorsa ona mal olur. Ama kimyada durum böyle değildir. Daha önce ATP'yi 10 liralık banknota benzetmiştim ve özellikle bu değeri seçmiştim. ATP'deki bağıl enerjiler öyledir ki, bir ATP elde etmek için 10 lira harcamanız gerekir, harcadığınızda da tam olarak 10 lira alırsınız (asıl değer 65 kJ/mol'dür, ama mesele aynıdır). İnsanların kullandığı para da olduğu gibi görelî değildir. Menfezlerden ayrılmaya çalışan her bakteri için sorunun kökeninde bu vardır. ATP evrensel bir 10 liralık banknot olarak o kadar da evrensel bir para birimi değildir, bozuk para diye bir şey yoktur. İlk buluşmada buzları kırmak için ucuz bir içki ısıtmak istiyorsunuz diyelim, içki 2 lira bile tutsa, 10 liranızı verdiğinizde paranızın üstünü alamazsınız, bir ATP molekülünün beşte biri gibi bir şey yoktur. Hidrojen ile karbondioksit tepkimesi sonucu salınan enerjiyi yakalarsanız, bu enerjiyi ancak 10 liralık birimler halinde saklayabilirsiniz. Prensip itibarıyla, tepkimeden 18 lira kazandığınızı söyleyelim, iki ATP için yeterli değildir, bu yüzden sadece bir ATP alırsınız. 8 lirayı kaybederseniz, çünkü bozuk para diye bir şey yoktur. Sadece büyük meblağlarla uğraşan döviz bürolarında çoğumuz aynı sorunu yaşarız.

O halde genel olarak bakıldığında, sonuçta 18 lira getirecek olan işleri başlatmak için 2 lira harcamanız gerekse de, evrensel 10 liralık banknotumuzu kullanmak zorunda kaldığımızda, 10 lira kazanmak için 10 lira harcamamız gerekir. Bakteriler bu denklemden kaçınmaz, hiçbir bakteri sadece ATP'yi kullanarak

hidrojen ve karbondioksitin doğrudan tepkimesiyle büyüyemez. Ama 10 liralık banknotları küçük bozukluklara ayırmanın dahice bir yolunu kullanarak büyürler. *Chemiosmosis* gibi sıkı bir isimle tanınan, onu açığa çıkaran Britanyalı ilginç biyokimyager Peter Mitchell'a 1978'te Nobel Ödülü'nü kazandırmış bir yöntemdir bu. Bu ödül, yıllardır devam eden acı kavgaları nihayet sona erdirmiştir. Bugün, yeni bir binyılın bakış açısıyla, Mitchell'ın keşfinin yirminci yüzyılın en önemli keşifleri arasında yer aldığını görebiliyoruz.⁷ Ama *chemiosmosis*'in öneminde uzunca bir süredir ısrar eden pek az araştırmacı bile, böyle tuhaf bir mekanizmanın neden hayatta her yerde karşımıza çıktığını açıklamakta zorlanıyor. Genetik şifre, Krebs döngüsü ve ATP gibi, *chemiosmosis* de hayatın geneline yayılmıştır, öyle görünüyor ki son evrensel ortak atanın, LUC'A'nın da bir özelliğidir. Martin ve Russell neden böyle olduğunu açıklıyorlar.

Basitçe ifade edersek, *chemiosmosis* protonların bir zar üzerinde hareket etmesidir. (Bu yüzden ismi, suyun bir zar üzerinde hareket etmesini ifade eden *osmosis*'e benzer.) Solunum yaparken olan şey budur. Elektronlar besinlerden sıyrılır ve bir taşıyıcılar zinciriyle oksijene ulaştırılır. Birkaç noktada salınan enerji bir zar üzerinden proton pompalamakta kullanılır. Sonuçta zar üzerinde bir proton ölçeği oluşur. Bu zar, bir çeşit hidroelektirik santral gibi hareket eder. Tıpkı tepedeki bir rezervuardan akıp gelen suyun bir türbini çevirip elektrik üretmesi gibi, hücrelerde de protein türbinlerinden zara proton akışları ATP sentezini sağlar. Bu mekanizma tümüyle beklenmedik bir mekanizmadır, iki molekül arasında güzel doğrudan bir tepkime yerine ortaya tuhaf, kademeli bir proton ölçeği, bir proton merdiveni eklenir.

Kimyagerler tam sayılarla çalışmaya alışıktır, bir molekülün bir başka molekülün yarısıyla tepkimeye girmesi mümkün değildir. Bu herhalde *chemiosmosis*'in en kafa karıştırıcı yönlerinden biridir, bolca kesirli sayı içerir. Bir ATP üretmek için kaç tane elektronun aktarılması gerekir. 8-9 kadar. Peki kaç tane proton? Halihazırdaki en doğru tahmin 4,33'tür. Kademeli bir ölçeğin aracılığı takdir görünceye kadar, bu gibi rakamların hiçbir an-

lamı yoktu, nihayetinde bir ölçek bir milyon dereceden oluşur, tam sayılar oluşturmaz. Kademeli bir ölçeğin, bir merdivenin yararı, tek bir tepkimenin tek bir ATP molekülü üretmek için üst üste tekrarlanabilmesidir. Tek bir tepkime bir ATP üretmek için gerekli enerjinin yüzde birini salıyorsa, tepkime yüz kez daha tekrarlanır, böylece proton rezervuarı tek bir ATP üretecek kadar büyük oluncaya kadar merdiven basamak basamak dolar. Hücre birden tasarruf edebilir hale gelmiştir; cebi bozuk para doludur.

Bütün bunlar ne anlama geliyor? Hidrojen ve karbondioksit tepkimesine geri dönelim. Bakterilerin çemberi döndürmesi hâlâ bir ATP'ye mal oluyor, ama bakteriler artık bir ATP'den fazlasını üretebilirler, çünkü ikinci bir ATP üretmek için tasarruf edebiliyorlar. Güzel bir hayat değil, ama dürüst bir hayat. Daha da önemlisi bu, büyüme olasılığıyla, hiç büyüme olasılığı olmaması arasındaki farkı oluşturur. Martin ve Russell haklılarsa, hayatın ilk biçimleri bu tepkimelerden doğduysa, bu durumda hayatın derin denizlerdeki menfezlerden ayrılmasının tek yolu *chemiosmosis*'tir. Bugün bu tepkimeyle yaşayan yegane hayat biçimlerinin hem *chemiosmosis*'e dayandığı hem de onsuz büyüyemediği kesinlikle doğrudur. Dünya üzerindeki hayatın neredeyse tamamının, her zaman ihtiyaç olmasa bile bu ilginç mekanizmayı paylaştığı da doğrudur. Peki neden? Onsuz yaşamayacak olan ortak bir atadan miras aldıkları için böyle olduğunu düşünüyorum.

Ama Martin ve Russell'ın haklı olduklarını düşünmemizin başlıca sebebi şudur: protonların kullanılması. Peki neden kendi sinir sistemlerimizin kullandığı elektirik yüklü sodyum, potasyum ya da kalsiyum atomları değil? Kademeli bir ölçek, bir merdiven için protonların elektirik yüklü başka parçacık tiplerine yeğlenmesinin belirgin bir sebebi yoktur, bir proton merdiveni yerine bir sodyum merdiveni üreten nadir de olsa bazı bakteriler vardır. Sanırım, asıl sebep, Russell'ın menfezlerinin özelliklerine uzanıyor. Menfezlerin çözülmüş karbondioksitin asitlendirdiği bir okyanusa bazik sıvılar püskürttüğünü hatırlayalım. Asitler protonlar bağlamında tanımlanır, bir asit proton bakımından zengindir, baz fakirdir. Dolayısıyla asitli okyanuslara bazik sı-

vılar püskürtmek, doğal bir proton merdiveni oluşturur. Başka bir deyişle, Russell'ın bazik menfezlerindeki mineral hücreleri doğal olarak *chemiosmotic*'tir. Russell buna yıllarca önce dikkat çekmiştir, ama bakterilerin *chemiosmosis* olmaksızın menfezlerden ayırlamaması olgusu, mikropların enerji sistemlerini araştıran Martin'le işbirliğinin meyvelerinden biri olmuştur. Yani bu elektrokimyasal reaktörler organik moleküller ve ATP üretmekle kalmıyor, bir kaçış planı, evrensel 10 liralık banknottan kaçınmanın yolunu da sunuyorlardı.

Elbette ki doğal bir proton merdiveni ancak hayat bu merdivenden yararlanabiliyor, sonra da kendi merdivenini oluşturuyorsa işe yarar. Önceden var olan bir merdiveni kullanmak sıfırdan yeni bir şey yaratmaktan kesinlikle çok daha kolaysa da, ikisi de doğrudan ortaya çıkmamıştır. Bu mekanizmalar doğal seçilimle oluşmuştur, buna hiç kuşku yoktur. Bugün bu mekanizmalar genlerin belirlediği çok sayıda proteini gerektirir, böyle karmaşık bir sistemin de proteinler ve genler, DNA'dan oluşan genler olmaksızın evrilmiş olabileceğini düşündürecek bir gerekçe yoktur. Demek oluyor ki ilginç bir döngüyle karşı karşıyayız. Hayat kendi *chemiosmotic* merdivenini nasıl kullanacağını öğreninceye kadar menfezlerden çıkma imkanına sahip değildi, ama kendi merdiveninden de ancak genleri ve DNA'yı kullanarak yararlanabilirdi. Kaçınılmaz görünüyor: Hayat kayalık kuluçkasında şaşırtıcı derecede sofistike bir derecede evrilmiştir.

Bu durum dünya üzerindeki bütün hayatın son ortak atasıyla ilgili olağandışı bir portre çiziyor. Martin ve Russell haklılarsa (ben öyle olduğunu sanıyorum) ortak atamız serbest canlı bir hücre değil, demir, sülfür ve nikelden oluşan katalizör duvarlarla kaplı mineral hücrelerin ortaya çıkardığı kayalık bir labirentti ve doğal proton merdivenleriyle enerji sağlıyordu. İlk hayat, karmaşık moleküller ve enerji üreten, üretimini protein ve DNA'ya vardırان gözenekli bir kayaydı. Bu demek oluyor ki bu bölümde hikayenin sadece yarısına gelebildik. Gelecek bölümde diğer yarısını, bütün moleküllerin en ikonigini, genlerin malzemesi DNA'yı anlatacağız.

II

DNA

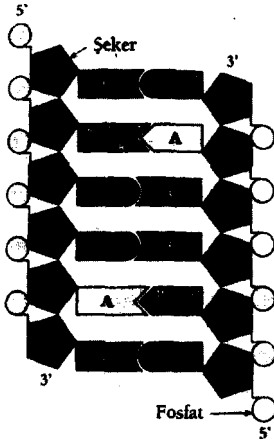
Hayatın Şifresi



Cambridge'te *The Eagle* barına, barda yapılan sohbetlerdeki olağandışı değişikliğin ellinci yıldönümünü anmak üzere 2003'te asılmış mavi bir levha var. 28 Şubat 1953'te öğle saatlerinde barın müdavimlerinden James Watson ve Francis Crick içeri dalmışlar ve hayatın sırrını keşfettiklerini açıklamışlardı. Hararetli Amerikalı ile sinir bozucu bir kahkahası olan konuşkan İngiliz zaman zaman komik sahneler sergilemenin eşğine geliyormuş gibi görünseler de bu kez ciddi ve yarı yarıya da haklılardı. Hayatın bir sırrı olduğu söylenebilirse, hiç kuşku yok ki o sır DNA'dır. Ama Crick ile Watson bütün akıllılıklarına rağmen o sırada sırrın sadece yarısını öğrenmişlerdi.

Crick ve Watson o sabah DNA'nın ikili bir sarmal olduğunu anlamışlardı. Deha, model kurma, kimyasal akıl yürütme ve X ışınının kırınımıyla alınmış birkaç fotoğrafın karışımına dayalı, esin dolu bir zihinsel sıçramayla gelen kavrayışları Watson'ın deyişiyle "o kadar hoştu ki doğru olması gerektiğini" düşünmüşlerdi. O öğle arasında bu konudan bahsettikçe, öyle olduğuna da daha fazla kani oldular. Buldukları çözüm 25 Nisan'da *Nature*'da bir sayfalık bir mektup olarak yayınlandı, yerel gazetelerdeki dogum haberlerinden pek farklı olmayan bir duyuruydu. Olağanüstü derecede ılımlı bir tonda yazılmış bu mektup, utangaç bir

ifadeyle son buluyordu: “İleri sürdüğümüz bu özgül eşleşmenin, açıkça genetik malzemenin olası bir kopyalama mekanizmasını akla getirdiği de dikkatimizden kaçmadı.”



Şekil 2.1 DNA'nın baz çiftleri. Harflerin geometrisi G'nin sadece C'yle, A'nın da sadece T'yle bağlandığı anlamına gelir.

DNA tabii ki genlerin, kalıtsal malzemenin yapı taşıdır. İnsanları, amipleri, mantarları ve bakterileri, birkaç virüs dışında bu dünyadaki her şeyi şifreler. İkili sarmal bilimsel bir ikondur: sonu gelmez bir takip içinde birbirlerini döne döne takip eden iki sarmal. Watson ve Crick her bir sarmalın diğerini moleküler düzeyde nasıl tamamladığını göstermişlerdi. Sarmalları ayırırsanız her biri diğerini yeniden oluşturmak için şablon olarak davranır, bir sarmal varken birbirinin aynı iki sarmal ortaya çıkar. Bir organizma her ürettiğinde, DNA'sının bir kopyasını yavrusuna geçirir. Yapılması gereken tek şey orijinalin iki kopyasını üretmek için sarmalı ikiye ayırmaktır.

Ayrıntılı moleküler mekanik herkeste berbat bir baş ağrısına sebep olabilirse de DNA'nın temelde çok güzel, nefes kesen bir yalınlığı vardır. Genetik şifre ardışık olarak sıralanmış harflerden (daha teknik bir deyişle “bazlar”dan) oluşur. DNA alfabesinde sadece dört harf vardır: A, T, G ve C. Bunlar adenin, timin, guanin ve sitozini ifade eder, ama bu kimyasal isimler üzerinde durmayalım. Mesele şudur ki şekilleri ve bağ yapıları gereği, A sade-

ce T ile C de sadece G ile eşleşebilir (Şekil 2.1). Çift sarmalı ikiye ayırırsanız, sarmalların her biri eşleşmemiş harflerle dolu olur. Açıkta kalan her A'ya sadece T, her C'ye sadece G bağlanabilir. Bu baz çiftleri birbirlerini tamamlamakla kalmaz, gerçekten de birbirleriyle bağ kurmak isterler. T'nin sıkıcı kimyasal hayatını aydınatabilecek bir tek şey vardır, o da A'ya yakın olmaktır. İkisini bir araya getirirseniz aralarındaki bağlar sevgi dolu bir ahenkle çınlar. Bu gerçek kimyadır işte, sahici bir "temel çekim"dir. Dolayısıyla DNA sadece edilgin bir şablon değildir, her sarmal alter egosu için bir tür mıknatıstır. Sarmalları ayırırsanız kendiliğinden yeniden birleşirler, ayrı tutarsanız her sarmal mükemmel eşi için hummalı bir çabaya giren bir şablon olur.

DNA'daki harflerin dizilimi sonu gelmez uzunluktaymış gibi görünmektedir. Örneğin, insan genomunda üç milyar harf (baz çifti) vardır, genetik jargonuyla söylersek 3 Gigabaz harf. Bu demek oluyor ki bir hücrenin çekirdeğindeki tek bir kromozom setinde 3.000.000.000 harf vardır. Bu harfler basılırsa insan genomu her biri bir telefon rehberi kalınlığında iki yüz cilt doldurur. İnsan genomu hiçbir şekilde en uzun DNA değildir. Biraz şaşırtıcı, ama bu rekor değersiz bir amipte, *Amoeba dubia*'dadır; bu amipin bizimkinin 220 katı büyüklükte 670 Gigabazlık devasa bir genomu vardır. Öyle görünüyor ki bu genomun çok büyük bir bölümü "çöp" tür, hiçbir şeyi şifrelemez.

Bir hücre her bölündüğünde DNA'sının tamamını kopyalar, birkaç saatte tamamlanan bir süreçtir bu. İnsan bedeni, her biri aynı DNA'nın sadık bir kopyasını (aslında iki kopyasını) taşıyan 15 trilyon hücreden oluşan bir devdir. Tek bir yumurta hücre-sinden bedeninizi oluşturmak için DNA sarmallarınız 15 trilyon kere (aslında çok daha fazla kere, çünkü hücreler ölür ve yerlerini yenileri alır) ayrılarak bir şablon gibi davranır. Her harf mucizevi denecek bir kesinlikle kopyalanır, en baştaki düzen bir trilyonda 1 harf gibi bir hata payıyla yeniden yaratılır. Bir karşılaştırma yapacak olursak, aynı kesinlik ve titizlikle çalışan bir katibin kutsal kitabın tamamını 280 kere kopyaladıktan sonra tek bir hata yapması gerekirdi. Aslına bakarsanız, katiplerin hata

payı çok daha yüksektir. Yeni Ahit'in 24.000 el yazması kopyasının günümüze ulaştığı söyleniyor, hiçbir kopya da birbirinin aynı değildir.

Ama DNA'da bile hatalar birikir, bunun sebebi genomun çok büyük olması olsa gerektir. Bu gibi hatalara noktasal mutasyonlar denir, bir harfin yerini hatayla bir başkası alır. İnsan hücreleri her bölündüğünde, kromozom seti başına üç mutasyon görmeyi bekleyebilirsiniz. Bir hücre ne kadar fazla bölünürse bu gibi mutasyonlar o kadar fazla birikir ve nihayetinde kanser gibi hastalıklara yol açar. Mutasyonlar sonraki kuşaklara da geçer. Dölllenmiş bir yumurta bir dişi embriyosu olarak gelişirse, yeni bir yumurta hücresinin oluşumu için 30 tur hücre bölünmesi gerçekleşmesi gerekecektir; her yeni turda birkaç mutasyon daha eklenecektir. Erkeklerde durum daha da beterdir, sperm oluşumu için yüz tur hücre bölünmesi gerekir, her tur kaçınılmaz olarak beraberinde daha fazla mutasyon getirir. Sperm üretimi hayat boyunca devam ettiğinden, her yeni hücre bölünmesi turunda, adam yaşlandıkça durum daha da kötüleşir. Genetikçi James Crow'un belirttiği üzere, nüfusta mutasyon bakımından en büyük sağlık tehdidi sperm üretimi devam eden yaşlı erkeklerdir. Ama ebeveynleri genç ortalama bir çocukta bile, ebeveynlerine kıyasla 200 yeni mutasyon vardır. (Gerçi toplansanız bunların ancak bir avuç kadarı doğrudan zararlı olabilir.)¹

Yani DNA'nın kopyalanmasındaki dikkat çekici sadakate rağmen, değişiklikler olur. Her kuşak bir öncekinden farklıdır, sadece genlerimiz cinsellikle karıştığından değil, yeni mutasyonlar da taşıdığımız için böyle olur. Bu mutasyonların birçoğu biraz önce bahsettiğimiz "noktasal" mutasyonlardır, tek bir DNA harfindeki değişikliklerdir, ama bazıları hepten ciddidir. Kromozomların tamamı kopyalanır ya da ayrılamaz, DNA'nın koca koca bölümleri silinir, virüsler araya yeni parçalar sokarlar, kromozom parçaları ters dönerek harflerin sıralamasını değiştirir. Olasılıklar sonsuzdur, gerçi en beter değişiklikler nadiren hayatta kalır. Bu düzeyde görüldüğünde, genom bir yılan yuvası gibi karışıktır, yılan kavi kromozomları kaynaşır, bölünür, ebedi bir

huzursuzluk kol gezer. Doğal seçim, en hafifi dışında hepsini ortadan kaldırarak bir istikrar kuvveti olarak işler. DNA dönüşür, bükülür, seçim hizaya sokar. Olumlu değişimler korunur, daha ciddi hatalar ya da değişiklikler kelimenin tam anlamıyla düşer. O kadar ciddi olmayan diğer mutasyonlar hayatın sonraki yıllarında hastalıklarla ilişkili olabilir.

Gazetelerde genlerimizle ilgili okuduğumuz neredeyse her şeyin arkasında DNA'daki harflerin sırasının değişmesi vardır. Örneğin DNA imzası (ebeveynliği tescil etmek, başkanları azletmek ya da olaydan yıllar sonra suçluları tespit etmek için kullanılır) bireyler arasında harflerin dizilimindeki farklılıklara dayanır. DNA'da çok fazla farklılık olduğundan, her birimizin kendimize özgü benzersiz bir DNA "imzası" vardır. Benzer şekilde birçok hastalığa yatkınlığımız da DNA dizilimindeki küçük farklılıklara dayanır. İnsanlar arasında ortalama her 1000 kadar harfte 1 harf farklılık görülür, bu da insan genomunda 6 ila 10 milyon tek harf farklılığı demektir; bu farklılıklara "snip" denir ("tek nükleotid polimorfizm" anlamına gelen "single nucleotid polymorphism" yerine). Sniplerin varlığı, hepimizin çoğu genin biraz değişik bir versiyonunu taşıdığımız anlamına gelir. Birçok snip neredeyse kesinlikle önemsizse de, bazıları istatistiksel olarak şeker hastalığı ya da Alzheimer hastalığı gibi rahatsızlıklarla ilişkilendirilmiştir, gerçi etkilerini nasıl gösterdikleri genellikle belirsizdir.

Bu farklılıklara rağmen, "insan genomu"ndan bahsetmek hâlâ mümkündür; bütün sniplere rağmen, her 1000 harften 999'u hepimizde hâlâ aynıdır. Bunun iki sebebi vardır: Zaman ve seçim. Şeylerin evrimsel planında hepimizin maymun olduğu günlerden bu yana çok zaman geçmemiştir; hatta bir zoolog hepimizin hâlâ maymun olduğuna beni inandırabilir. İnsanın şempanzeyle ortak atasından yaklaşık 6 milyon yıl önce ayrıldığını, o zamandan bu yana her kuşakta 200 mutasyon hızıyla mutasyonları biriktirdiğini varsayarsak, mevcut süre zarfında genomumuzun yaklaşık %1'ini değiştirmeye vaktimiz olmuştur. Şempanzelerin de aynı hızda evrildiğini varsayarsak, kuramsal

olarak %2'lik bir farklılık görmeyi bekleriz. Aslında aradaki fark bundan biraz daha azdır; DNA dizilimi dikkate alındığında, şempanzeler ve insanlar yaklaşık %98,6 benzerdir.² Bunun sebebi, seçilimin zararlı değişikliklerin çoğunu ayıklayarak frene basmasıdır. Değişiklikler seçilimle ayıklanıyorsa, varlığını sürdüren dizilimler arasındaki benzerliklerin, değişimin sınırsız olması haline kıyasla daha fazla olacağı açıktır; seçim yine düzelticidir.

Derin zamanda daha ileri gidersek, bu iki özelliğin, zaman ve seçilimin dokuların en muhteşemini, en inceliklisini ortaya çıkardığını görürüz. Gezegenimizdeki hayatın tamamı birbiriyle ilişkilidir, DNA'daki harflerin okunması da tam olarak nasıl ilişkili olduğunu göstermektedir. DNA dizilimlerini karşılaştırarak maymunlardan keselilere, sürüngenlere, ikiyaşamlılara, balıklara, kabuklulara, solucanlara, bitkilere, protozoaya, bakterilere, aklınıza ne gelirse ona istatistiksel olarak ne kadar yakın olduğumuzu görebiliriz. Hepimiz tam olarak benzer harf dizilimleriyle tanımlanırız. Hatta hepimizde ortak dizilim parçaları da vardır, ortak seçimle sınırlanmış parçalardır bunlar, diğer kısımlarsa tanınamayacak kadar değişmiştir. Bir tavşanın DNA dizilimini okuduğumuzda, bazların aynı sonu gelmez ardışıklık içinde dizildiğini, bazı kısımların bizimkiyle aynı, bazılarının bizimkinden farklı olduğunu, tıpkı bir kaleydoskop gibi iç içe geçtiğini görürüz. Aynı şey bir devedikenin için de geçerlidir: Dizilim aynıdır, yer yer benzerdir, ama artık geniş kısımlar farklıdır, ortak bir atayı paylaşmamızdan bu yana geçen engin zamanı ve sürdüğümüz son derece farklı hayat tarzlarını yansıtır. Ama hepimizin derin biyokimyası hâlâ aynıdır, hepimiz büyük ölçüde aynı biçimde işleyen hücrelerden inşa edilmişizdir, bu hücreler de hâlâ benzer DNA dizilimleriyle tanımlanırlar.

Bu derin biyokimyasal ortak yönleri dikkate aldığımızda, bakteriler gibi en uzak hayat biçimleriyle bile ortak dizilimler bulmayı bekleyebiliriz ve buluruz da. Ama aslında bu noktada bir kafa karışıklığına kapılmak da mümkündür, çünkü dizilim benzerliği beklenebileceği üzere %0 ile %100 arasında kalan bir ölçekte saptanmaz, %25 ile %100 arasında kalan bir ölçekte sap-

tanır. Bu, DNA'nın dört harfinin bir yansımasıdır. Bir harf rastgele başka bir harfin yerini alıyorsa, o harfin aynı harfin yerini alması ihtimali %25'tir. Aynı şekilde rastgele bir DNA parçası laboratuvarda sıfırdan sentezlenirse, rastgele seçilmiş genlerimizden herhangi biriyle mutlaka %25'lik bir dizilim benzerliği olması gerekir, her bir harfin insan DNA'sından bir harfe uyması olasılığı %25'tir. Sonuçta, genom dizilimimizin %50'si muzla ortak diye hepimizin "yarı muz" olduğu fikri, ılımlı bir dille söyleyecek olursak yanıltıcıdır. Aynı mantığa başvurursak, rastgele üretilmiş herhangi bir DNA parçası %25 insan olurdu. Harflerin aslında ne anlama geldiğini bilmediğimiz sürece, tam bir karanlık içindeyiz.

Watson ile Crick de 1953 yılının o sabahı işte bu yüzden, hayatının sırrının sadece yarısını kavramış bulunuyorlardı. DNA'nın yapısını öğrenmişlerdi, ikili sarmalın her bir kolunun diğerini oluşturmak için bir şablon görevi görebileceğini, böylece her organizmanın kalıtsal şifresini oluşturduğunu anlamışlardı. Meşhur makalelerinde belirtmedikleri şey, harf dizilimlerinin aslında neyi şifrelediği, çünkü bunun ortaya çıkarılması on yıllık bir araştırma daha yapılmasını gerektirmişti. Çift sarmalın, içindeki harflere hiç aldırmayan gösterişli sembolizminden yoksun olsa da, hayatın şifresinin çözülmesi Crick'in kendisinin de önemli bir rol oynadığı çok daha büyük bir başarıydı herhalde. Daha da önemlisi, çözülmüş olan bu şifre (başta modern biyolojinin en kafa karıştıran hayal kırıklığı), bu bölümdeki bakış açımızla yaklaşırsak, DNA'nın en başta, yaklaşık dört milyar yıl önce nasıl evrildiğine dair ilginç kavrayışlar sunuyordu.



DNA o kadar modern görünmektedir ki 1953'te moleküler biyolojinin temelleri hakkında ne kadar az şey bilindiğini takdir etmek zordur. DNA, Watson ile Crick'in ilk makalesinden fırlayıp çıkmıştı, Crick'in ressam eşi Odile'in grafik tasarımıyla bükülen bir merdiven şeklinde gösterilen yapısı yarım yüzyıl boyunca pratikte hiçbir değişiklik yapılmaksızın kullanıldı



Şekil 2.2 DNA çift sarmalı, iki şeridin birbirlerinin etrafında sarmal oluşturduğu görülüyor. Şeritlerin birbirinden ayrılması her birinin tamamlayıcı yeni bir şeridin modeli olmasını mümkün kılar.

(Şekil 2.2). Watson'ın 1960'larda kaleme aldığı ünlü kitabı *İkili Sarmal* (*The Double Helix*) modern bir bilim tablosu çiziyordu, hatta o kadar etkili olmuştu ki muhtemelen hayat sanatı taklit etmeye başlamıştı. Örneğin ben, Watson'ın kitabını okuldayken okuduğumda Nobel ödülleri, çığır açacak keşiflerin hayallerine dalmıştım. Geri dönüp baktığımda, bilimin aslında nasıl yapıldığına dair kavrayışımın neredeyse tamamen Watson'ın kitabına dayandığını görüyorum, üniversitede kaçınılmaz olarak uyanmam da gerçekliğin beklediğim heyecanı doğurmamasından kaynaklanmış olabilir pekala. Heyecan bulmak için kaya tırmanışına sardım ben de. Bilimin

entelektüel heyecanının yeniden iliklerime işlemesinden birkaç yıl öncesiydi.

Ama üniversitede öğrendiklerimin, hemen hemen tamamı 1953'te Watson ve Crick tarafından bilinmiyordu. Bugün "genler proteinleri şifreler" genel kabul görmüştür, ama 1950'lerin başında bu konuda bile pek bir fikir birliği yoktu. Watson 1951'de Cambridge'e ilk geldiğinde, Max Perutz ve John Kendrew'un açık fikirli şüpheciliği yüzünden çok geçmeden öfkeden kuduracaktı. Perutz ve Kendrew'a göre, genlerin proteinlerden değil de DNA'dan oluştuğu makul bir kuşku payını aşacak şekilde kanıtlanmamıştı. DNA'nın moleküler yapısı bilinmiyor olsa da kimyasal yapısı yeterince açıktı ve bir türden diğerine nadiren farklılık gösteriyordu. Genler kalıtımın temeliyse ve bireyler ile türler arasındaki çok sayıda farklılığı şifreliyorsa, bileşimi itibarıyla hayvanlardan bitkilere ve bakterilere hiçbir değişiklik göstermeyen böyle tekdüze bir bileşik, hayatın zenginliğini ve çeşitliliğini

açıklamaya nasıl başlayabilirdi? Proteinler sonsuz çeşitlilikleri içinde böyle abidevi bir işe çok daha uygun görünüyordular.

Amerikalı biyokimyager Oswald Avery'nin 1944'te yayınladığı, genlerin DNA'dan yapıldığını gösteren titiz deneylere ikna olan pek az biyolog arasında Watson da bulunuyordu. Sadece ve sadece Watson'ın şevki ve inancı Crick'i bu meseleyi ele almaya, DNA'nın yapısını çözme işine girmeye ikna etmişti. DNA'nın yapısı çözüldüğünde de şifre meselesi bastırmaya başladı. Burada da yine cehaletin derinliğinin, modern kuşaklar açısından şaşırtıcı olduğunu görürüz. DNA sadece dört farklı harfin, görünürde rastgele bir düzen içinde sonu gelmez ardışıklığıdır. Harflerin düzeninin bir şekilde proteinleri şifreleyebileceğini görmek prensipte kolaydı. Proteinler de amino asit denilen yapı taşlarının ardışık diziliminden oluşur. DNA'daki harflerin diziliminin proteinlerdeki amino asitlerin dizilimini şifrelediği sanılıyordu. Ama şifre evrenselse, ki zaten öyle olduğu ortaya çıkmıştı, amino asit listesinin de evrensel olması gerekir. Bu da hiçbir şekilde tescil edilmiş değildi. Watson ile Crick bir öğle arasında *The Eagle*'da oturup bugün bütün ders kitaplarında bulunan 20 amino asitten oluşan listeyi kaleme alıncaya kadar, pek üzerine düşünülmüş bir mesele de değildi. İkisinin de biyokimyager olmadığı dikkate alınırsa, ilk atışta tutturmuş olmaları dikkat çekicidir.

Sorun artık ortaya konmuştu ve hızla da sonraki kuşakların hazırcı öğrendiği moleküler ayrıntıların hiçbirisiyle sınırlanmayan matematiksel bir oyun haline geldi. DNA'daki dört farklı harfin 20 amino asidi şifrelemesi gerekiyordu. Bu da doğrudan bir alfabe çevrimini bir kenara bırakmış oluyordu, DNA'daki tek bir harfin bir tek amino asidi temsil edemeyeceği açıktı. İki harfli bir şifreyi de dışarıda bırakıyordu, böyle bir şifre ancak 16 amino asit şifreleyebilirdi (4×4). En az üç harf gerekiyordu: Daha sonra Crick ve Sydney Brenner'ın kanıtladığı üzere, üç DNA harfinden oluşan grupların tek bir amino asidi şifrelediği üçlü bir şifre. Ama bu ciddi bir savurganlıkmiş gibi görünüyordu. Dört harf 64 tane üçlü oluşturabiliyordu ($4 \times 4 \times 4$), dolayısıyla 64 farklı amino asidi şifreleyebilirdi. Peki neden sadece 20 amino asit?

Sihirli cevabın dört harfli alfabeyi anlamlı kılması gerekiyordu, her biri üç harfli 64 kelime halinde örgütlenmiş, 20 amino asidi şifreleyen bir alfabe.

Herhalde uygun denebilecek bir biçimde, bir tür cevap öneren ilk kişi bir biyolog değil, daha çok büyük patlama hakkındaki kuramlarıyla tanınan Rus-Amerikan fizikçi George Gamow oldu. Gamow'a göre DNA, kelimenin tam anlamıyla proteinlerin şablonuydu: Amino asitler sarmalın bükümleri arasında elmas şeklindeki dar kanallarda yuvalanıyordu. Ama Gamow'un kuramı temelde sayısaldır, Gamow proteinlerin çekirdekte bulunmadığını, DNA'yla hiç doğrudan temas içinde olmadığını öğrenince biraz rahatsız olmuştu. Fikri birden soyut bir hal almıştı. Özü itibarıyla Gamow örtüşen bir şifreleme ileri sürüyordu, böyle bir şifrelemenin şifre uzmanlarının çok sevdiği büyük bir yararı vardı, enformasyon yoğunluğunu en üst düzeye çıkarıyordu. ATCGTC diye bir dizilim düşünelim. İlk "sözcük", yani teknik olarak "kodon" ATC, ikincisi TCG, üçüncüsü CGT olur vs. Kritik önemdeki bir nokta, örtüşen şifrelerin izin verilen amino asit dizilimini her zaman sınırlamasıydı. ATC belli bir amino asidi şifreliyorsa, onu "kodon"u TC ile başlayan bir amino asidin izlemesi, ondan sonra gelenin de C ile başlaması gerekir. Bütün permütasyonlar titizlikle çıkarıldığında, çok sayıda üçlüye izin verilmediği görülür, onlar bu örtüşen şifrelemenin parçası olamazlar, çünkü bir A'nın her zaman T'yle, T'nin C ile vs. olması gerekir. Amino asitleri şifrelemek için geriye kaç üçlü kalır? Gamow, şapkadaki tavşan çıkaran bir sihirbaz edasıyla "Tamı tamına 20!" diyordu.

İnsafsız verilerin vurup indireceği birçok akıllıca fikirden ilkiydi bu. Örtüşen bütün şifreler kendi sınırlamalarıyla sabote edilir. En başta, proteinlerde bazı amino asitlerin her zaman birbirlerinin yanında görünmesi şart koşulur. Biri proteinlerin dizilimi, diğeri DNA'nın dizilimi için iki Nobel ödülü kazanan sessiz dahi Fred Sanger, o sıralarda insülinin dizilimi üzerinde çalışıyordu. Çok geçmeden herhangi bir amino asidin bir diğerrinin yanında belirebileceği açıklık kazandı, protein diziliminde

bir sınır yoktu. İkinci büyük sorunsal bir mutasyonun (bir harfin yerine başka bir harfin geçmesi) örtüşen bir şifrede birden fazla amino asidi etkilemek zorunda olmasıydı, ama deneysel veriler genellikle tek bir amino asidin değiştiğini gösteriyordu. Açıkçası gerçekte şifrede bir örtüşme yoktu, Gamow'un örtüşen şifreleri, asıl şifrenin öğrenilmesinden çok önce çürütüldü. Şifre uzmanları Tabiat Ana'nın bir-iki numaraya geldiğinden şüphelenmeye başlamışlardı.

Sırada Crick vardı, o kadar güzel bir fikir önerdi ki destekleyici verilerin olmamasından ötürü kaygıları olsa da bu fikir herkes tarafından hemen kabul edildi. Crick, başta Watson'ın Harvard'daki yeni laboratuvarı dahil olmak üzere birkaç moleküler biyoloji laboratuvarından gelen yeni kavrayışlardan yararlanmıştı. Watson RNA'ya, DNA'nın çekirdeğin yanı sıra sitoplazmada bulunan daha kısa tek sarmallı bir versiyonuna kafayı takmıştı. Watson RNA'nın, bugün artık ribozom olarak bilinen, protein sentezinin gerçekleştiği yermiş gibi görünen minicik makinelerin ayrılmaz bir parçası olduğunu düşünüyordu. Yani DNA hareketsiz ve atıl olarak çekirdekte bulunur. Bir proteine ihtiyaç olduğunda, DNA'nın bir bölümü RNA'nın bir kopyasını çıkarmak için bir şablon olarak kullanılır; bu kopya fiziksel olarak çekirdekten, dışarıda bekleyen ribozomlara taşınır. Bu kanatlı haberciye çok geçmeden mesajcı RNA ya da mRNA denecekti. Yani Watson'ın daha 1952'de Crick'e bir mektubunda yazdığı gibi: "DNA yapar RNA yapar protein." Crick'in ilgisini çeken soru şuydu: "Mesajcı RNA'daki harflerin kesin dizilimi bir proteindeki amino asitlerin dizilimine nasıl tercüme edilir?" Crick bu meseleyi düşünmüş, RNA'nın mesajının her amino aside bir tane olmak koşuluyla bir dizi ayrı "adaptör" molekülün yardımıyla tercüme edilebileceğini ileri sürmüştü. Bu moleküllerin de RNA'dan yapılmış olması, her birinde mesajcı RNA'daki kodonu tanıyıp ona bağlanabilecek bir "karşıt kodon"u olması gerekiyordu. Crick bağlanma ilkesinin DNA'dakiyle aynı olduğunu söylüyordu: C ile G, A ile de T bağlanır vs.³ Bu gibi moleküler adaptörlerin varlığı o sıralarda tümüyle varsayımlara dayanıyor-

du, ama birkaç yıl içinde keşfedildiler ve Crick'in tahmin ettiği üzere RNA'dan oluşuyorlardı. Bunlara bugün transfer RNA'ları, yani tRNA'lar denir. Bütün bu eser bir Lego gibi gelmeye başlamıştı, parçalar birbirlerine bağlanarak, birbirlerinden ayrılarak muhteşem, ama gelip geçici yapılar oluşturuyordu.

İşte Crick burada yanıliyordu. Biraz ayrıntılı bahsedeceğim, çünkü gerçeklik Crick'in tahmin ettiğinden biraz daha tuhaf olsa da fikirleri başlangıçta etkili olmuş olabilir. Crick mesajcı RNA'yı sitoplazmada oturur halde resmetmişti, kodonları bir dişi domuzun memelerine benziyordu, her biri annesini emen küçük bir domuzcuk misali kendi taşıyıcı RNA'sına bağlanmaya hazırdı. Nihayetinde bütün tRNA'lar mesajcı RNA'nın uzunluğu boyunca yan yana dizilecekler, amino asitleri de bağlanıp bir protein oluşturmaya hazır halde domuzcukların kuyrukları gibi sarkıyor olacaktı.

Crick'e göre sorun tRNA'ların sahneye rastgele çıkmaları ve en yakındaki elverişli kodona bağlanmalarıydı. Ama baştan başlamıyor, sonda bitirmiyorlarsa bir kodonun nerede başladığını, bir sonrakinin nerede bittiğini nasıl bilebiliyorlardı, doğru okuma çerçevesini nerede görüyorlardı? Dizilim önceki gibi ATCGTC şeklindeyse, bir tRNA ATC'ye, bir sonraki GTC'ye bağlanabilirdi, ama bir tRNA'nın dizilimin ortasındaki CGT'yi tanıyıp ona bağlanmasını, böylece bütün mesajı karıştırmasını engelleyen şey neydi? Crick'in otoriter cevabı buna izin vermemektir. Mesajın tamamı muğlaklığa yer olmaksızın okunacaksa, kodonların hepsi anlamlı olamazdı. Hangilerine izin verilmeyecekti? Sadece A, C, U ya da G'den oluşan dizilimlerin diskalifiye olduğu açıktı, bir AAAAAA diziliminde doğru okuma çerçevesini yerleştirmenin bir yolu yoktu. Crick daha sonra bütün olası harf kombinasyonlarını döngüsel olarak denemişti. Kısacası, ATC anlamlı oluyorsa, bu durumda bu üç harfin döngüsel permütasyonlarına izin verilmeyecekti. (Eğer ATC'ye izin veriliyorsa, TCA ve CAT'e izin verilmemesi gerekiyordu.) Geriye kaç tane olasılık kalıyordu? Yine tam olarak 20 olasılık! (Olası 64 kodondan AAA, UUU, CCC ve GGG devre dışı bırakılınca geriye 60 tane kalıyordu,

bundan sonra da sadece bir tane üçlü permütasyona izin veriliyorsa, 60 üçe bölünecek ve cevap da 20 olacaktı.)

Şifrelerin örtüşmesinin tersine, Crick'in şifresi bir proteindeki amino asitlerin dizilimine hiçbir sınırlama getirmiyordu, noktasal bir mutasyonun mutlaka iki ya da üç amino asidi değiştirmesi de söz konusu değildi. Bu çözüm, ileri sürüldüğünde çerçeve okuma problemini gayet güzel bir biçimde çözmüş, 64 kodonu sayısal olarak tatmin edici bir biçimde 20 amino aside indirmişti; bilinen bütün verilerle de tamamen tutarlıydı. Ama yine de yanlıştı. Birkaç yıl içinde sadece AAA'lardan oluşan sentetik bir RNA'nın lizin amino asidinin bütün şifresini oluşturduğu (oysa Crick bunun mümkün olmadığını söylemişti), sadece lizinden oluşan bir protein polimerine de çevrilebileceği anlaşıldı.

Deneyssel araçlar daha sofistike bir hal aldıkça, birkaç araştırma grubu 1960'ların ortalarında yavaş yavaş asıl şifrenin parçalarını bir araya getirmeye başladı. Şifreyi çözme yönündeki sürekli çabaların ardından gelişigüzelmiş gibi görünen gerçeklik, son derece kafa karıştırıcı bir hayal kırıklığı olarak geldi. Şifre zarif bir sayısal çözüm sunmaktan uzak, dejenere bir görünüm sergiliyordu (yani, tekrarlarla doluydu). Üç amino asit altı farklı kodonla şifrelenmişti, diğerleri sadece bir ya da iki kodonla. Bütün kodonların bir kullanımı vardı, üçü "burada dur" koşulunu getiriyordu, geri kalanların hepsi bir amino asidi şifreliyordu. Görünüşe bakılırsa bir düzen, bir güzellik yoktu; hatta güzelliğin bilimde hakikatin rehberi olabileceği yolundaki fikrin de mükemmel bir panzehiriydi bu durum.⁴ Şifreyi açıklayabilecek belli bir yapısal neden bile yokmuş gibi görünüyordu, amino asitler ile kodonlar arasında hiçbir güçlü kimyasal ya da fiziksel yakınlık yoktu.

Crick hayal kırıklığı yaratan bu şifrenin "donmuş bir kaza" olduğunu açıkladı, çoğu kişinin elinden de ancak başlarını sallayarak ona katılmak geliyordu. Donmuştu, çünkü herhangi bir müdahalenin (şifrenin donmuşluğunun çözülmesinin) ciddi sonuçları olacaktı. Tek bir noktasal mutasyon şurada ya da burada bir amino asidi değiştiriyordu, şifrenin kendisindeki bir değişik-

lik de kesinlikle her şeyde felaket niteliğinde bir değişime sebep oluyordu. Bir kitapta, anlamı çok değiştirmeyen bir harf hatasını düzeltmekle bütün bir alfabeyi anlaşılmaz bir şeye dönüştürmek arasındaki fark gibi bir şeydi. Crick, şifre bir kere değişmez bir biçimde yazıldığında, biraz kurcalamanın ölümle cezalandırılabilceğini söylüyordu, bu bugün de biyologlar arasında yaygın olarak kabul edilen bir görüştür.

Fakat şifrenin “tesadüfî” niteliği Crick’e bir sorun çıkarmıştı. Neden bir tek tesadüf olmuştu, neden birkaç tane olmamıştı? Şifre keyfiyse, hiçbir şifre diğerinden daha yararlı olmazdı. Bu durumda, Crick’in tabiriyle “şifrenin bir tek versiyonunun bütün rakipleri karşısında bir seçim avantajına sahip olup ömrünü devam ettirmesini” sağlayacak seçici bir “kıstas”ın varlığı için bir gerekçe de yoktu. Ama Crick, böyle bir kıstas yoksa, farklı organizmalarda neden birkaç şifrenin bir arada bulunmadığını merak ediyordu.

Bunun apaçık cevabı, dünya üzerindeki bütün organizmaların, şifrenin çoktan değişmez olduğu ortak bir atadan türemiş olmalarıydı. Daha felsefi bir ifadeyle, dünyada hayat bir kez ortaya çıkmıştı, bu da onu eşsiz, olanaksız, hatta çılgınca bir gelişme kılıyordu. Crick’e göre bu bir bulaşmayı, tek bir aşılamaı düşünürüyordu. Crick, hayatın tohumlarının dünyaya, tek bir dünya dışı organizmadan türemiş bir bakteri kopyası olarak atıldığını düşünüyordu. Hatta daha ileri gitmiş, bakterilerin dünyaya gönderilen bir uzay gemisinden, uzaylı bir zeka tarafından kasten ekildiğini savunmuştu, bu fikre “amaçlı panspermia” diyordu. 1981’de yayınlanan, *Life Itself* isimli kitabında bu temayı geliştirmişti. Matt Ridley’nin Crick hakkındaki muhteşem biyografisinde ortaya koyduğu üzere, “Konu birkaç kişiden daha fazlasının kaşlarını kaldırdı. Muhteşem Crick uzaylı hayat biçimlerinin uzay gemisinden evrene tohum saçtığını düşünüyor ha? Başarı bu kadar mı başına vurmuştu?”

Tesadüfî bir şifre fikrinin gerçekten de bu kadar ağır bir felsefeyi haklı çıkarıp çıkarmadığı bir bakış açısı meselesidir. Şifrenin, bir kıstasa tabi olması için herhangi bir avantaj ya da yarar

sunması gerekmez: Herhangi bir özellikten yana güçlü bir seçim, onu bırakın bir asteroidin çarpması gibi çılginca bir kaza bile, tanımı itibarıyla tek bir şifreye sahip olması gereken tek bir klon dışında her şeyi silip geçmiş olabilir. Her ne olursa olsun, Crick'in zamanlaması talihsizdi. Crick'in o satırları kaleme aldığı 1980'lerin başından beri hayatın şifresinin ne donmuş ne de tesadüfi olmadığının farkındayız. Şifrede, dört milyar yıl öncesindeki kökenlerine dair ipuçları veren gizli örüntüler, "kodonlar içinde bir şifre" vardır. Bugün artık şifrenin, şifreleme uzmanlarının ayıpladığı bayağı bir şifreden çok uzak olduğunu, hem değişime direnme hem de evrimin hızını artırma becerisine sahip, milyonda bir rastlanabilecek türden bir şifre olduğunu biliyoruz.



Kodonlar içinde bir şifre! 1960'lardan bu yana şifrede çeşitli örüntüler göze çarpmıştır, ama bunların çoğunu tıpkı Crick'in yaptığı gibi tuhaf olmaktan öteye geçmeyen istatistiksel gürültüler olarak görüp bir kenara bırakmak kolaydır. Bir bütün olarak ele alındığında bile, genel örüntü pek anlam ifade ediyormuş gibi görünmez. Neden bu kadar az anlam ifade ettiği iyi bir sorudur, genetik şifrenin kökenlerine uzun süredir ilgi duyan Kalifornyalı biyokimyager Brian K. Davis de bu soru üzerine çalışmıştır. Davis, "donmuş tesadüf" fikrinin şifrenin kökenlerine duyulan ilgiyi dağıttığına dikkat çekmiştir: Neden bir tesadüfü inceleyelim ki? Tesadüfler olur işte! Davis, bunun da ötesinde, ilgisini koruyan bir avuç araştırmacının da baskın görüş olan ilksel çorba fikriyle yanlış yönlendirildiği inancındadır. Şifre bir çorbada başladıysa, en derindeki köklerinin, çorbadaki fiziksel ve kimyasal süreçlerle yaratılma ihtimali çok yüksek olan moleküllere uzanması gerekiyordu. Böyle bir fikir şifrenin temelini çekirdek bir amino asit grubu olduğu, diğer amino asitlerin sonradan eklendiği öngörüsünde bulunuyordu. Bu fikirde, kanıtların önce umutlandırıp sonra hayal kırıklığı yarattığını, hatta kafa karıştırdığını söyleyecek kadar hakikat vardı. Şifreyi ancak biyosentez ürünü olarak, hidrojen ve karbondioksitten kendi yapı taşlarını

yapma yetisine sahip hücrelerin ürünü olarak gördüğümüzde örüntüler anlam ifade etmeye başlar.

Peki bu ele geçmez örüntüler nelerdir? Üçlü şifrenin her bir harfine farklı bir örüntü bağlıdır. İlk harf en çarpıcıdır, çünkü basit bir öncülü bir amino aside çeviren adımlarla ilişkilidir. Bu ilke o kadar çarpıcıdır ki kısaca telaffuz etmeye değer. Bugün hücrelerde amino asitler birkaç farklı basit öncülle başlayan bir dizi biyokimyasal adımla oluşur. Şaşırtıcı gözlem şudur: Üçlü kodonun ilk harfiyle bu basit öncüller arasında bir bağlantı vardır. Öncül *pirüvattan* oluşan bütün amino asitlerin kodonunun ilk harfi aynıdır, bu örnekte T'dir.⁵ Birinci bölümde karşılaştığımız bir molekül olduğu için pirüvat örneğini kullandım. Pirüvat, hidrotermal menfezlerde karbondioksit ve hidrojenden, menfezlerde bulunan minerallerin katalizör etkisi sayesinde oluşabilir. Ama pirüvat bu bakımdan yalnız değildir, bütün amino asit öncülleri bütün hücrelerin merkezî biyokimyasının, yani Krebs döngüsünün bir parçasıdır ve hepsi de birinci bölümde tartıştığımız tipte bir hidrotermal menfezde oluşmalıdır. Bu noktada buradan çıkarabileceğimiz, kabul etmek gerekir ki zayıf, ama derinleşmeye yazgılı sonuç, hidrotermal menfezlerle üçlü şifrenin ilk harfi arasında bir bağlantı bulunduğudur.

Peki ya ikinci harf? Buradaki ilişki bir amino asidin suda çözülüp çözülmemesiyle, yani hidrofobikliğiyle ilgilidir. Hidrofilik amino asitler suda çözülür, hidrofobik amino asitlerse suyla karışmaz, hücrelerin lipid zarları gibi yağlarda çözülürler. Amino asitler “çok hidrofobik”ten “çok hidrofilik”e uzanan bir yelpaze üzerinde ayrıştırılabilir, işte üçlü şifrenin ikinci harfi bu yelpazeyle ilişkilidir. En hidrofobik altı amino asitten beşinin orta harfi T'dir, en hidrofilik amino asitlerin hepsinin ikinci harfi A'dır. Yelpazede ara konumda yer alan amino asitlerin şifrelerindeki ikinci harf ise G ya da C'dir. O halde bütün kodonların ilk iki harfi ile şifrelenen amino asit arasında, hangi sebeple olursa olsun, güçlü belirlenimci ilişkiler vardır.

Son harf dejenerasyonun yattığı yerdir, sekiz amino asitte dört katlı bir dejenerasyon (hoş bir teknik terimdir bu) görülür.

Çoğu insan dört katlı dejenerasyonu, yalpalayan bir sarhoşun dört ayrı çukura yuvarlanmayı becermesi şeklinde gözünün önüne getirir, biyokimyagerlerse sadece kodonun üçüncü harfinin enformasyondan bağımsız olduğunu ifade etmek ister, yani hangi harf olduğu önemli değildir, dört olasılığın hepsi de aynı amino asidi şifreler. Örneğin GGG üçlüsünün şifrelediği glisin örneğinde, son G harfi T'ye, A'ya ya da C'ye çevrilebilir, üçlülerin her biri yine glisini şifreliyor olacaktır.

Şifrenin üçüncü harfindeki dejenerasyonun birkaç ilginç sonucu vardır. İkili bir şifrenin 20 farklı amino asitten 16'sını şifreleyebileceğini zaten belirtmiştik. En karmaşık beş amino asidi çıkarırsak (geriye 15 amino asit ve bir durdurma kodonu kalır), şifrenin ilk iki harfindeki örüntüler daha güçlü bir hal alacaktır. O halde ilksel şifrenin bir ikili olması, sonradan “kodon yakalama” dolayımıyla, amino asitlerin üçüncü harf için birbirleriyle rekabet etmeleri sonucu genişleyip üçlü bir şifre halini alması söz konusu olabilir. Eğer böyleyse, ilk amino asitler üçlü kodonları “ele geçirme” konusunda “haksız” bir avantaja sahip olmuş olabilir, öyle görünüyor ki bu doğrudur. Örneğin ilk ikili şifreyle şifrlenmesi çok muhtemel 15 amino asit, 64 olası üçlülerden 53'ünü aralarında paylaşmışlar, böylece amino asit başına ortalama 3,5 kodon düşmüştür. Oysa tersine, “sonradan” eklenen beş amino asit aralarında sekiz kodonu paylaşmış, her birine ortalama sadece 1,6 kodon düşmüştür. İlk gelenler kesinlikle parsayı toplamış gibi görünmektedir.

O halde şifrenin başta üçlü değil de ikili bir şifre olması, toplam 15 amino asidi (artı bir “durdurma” kodonunu) şifrelemesi ihtimalini değerlendirelim. Öyle görünüyor ki bu ilk şifre neredeyse tamamen belirlenimcidir, bu da fiziksel ve kimyasal etkenlerin hakimiyetinde olduğu anlamına gelir. Şifrenin ilk harfinin amino asidin öncülüyle, ikinci harfininse hidrofobikliğiyle ilişkili olması kuralının birkaç istisnası vardır. Burada şansa pek yer yoktur, fiziksel kurallardan kurtuluş yoktur.

Ama üçüncü harf ayrı bir meseledir. Bu noktada, bu kadar fazla esneklik söz konusuysa şansa da yer olabilirdi, o şansla

birlikte seçilimin şifreyi “optimize” etmesi mümkün olabilirdi. İki İngiliz moleküler biyolog, Lawrence Hurst ve Stephen Freeland 1990’ların sonunda bu radikal varsayımı ileri sürmüşlerdir. İkili genetik şifreyi bilgisayarda rastgele üretilmiş milyonlarca şifreyle karşılaştırarak manşetlere çıkmışlardı. Bir kodonun bir harfinin yerini bir başka harfin aldığı noktasal mutasyonların yaratabileceği hasarı değerlendirmişlerdi. Bu gibi noktasal mutasyonlara hangi şifrenin ya aynı amino asidi koruyarak ya da onun yerine bir benzerini geçirerek daha iyi direnebileceğini merak ediyorlardı. Başlangıçtaki asıl genetik şifrenin değişime hayret verici bir direnci olduğunu gördüler: Noktasal mutasyonlar genellikle amino asit dizilimini koruyor, bir değişiklik olursa fiziksel olarak ilişkili amino asidin yerini bir benzerinin alması eğilimi gözleniyordu. Aslında Hurst ve Freeland genetik şifrenin rastgele üretilmiş bir milyon alternatif şifreden daha iyi olduğunu ilan ettiler, doğanın kör şifre uzmanının elinden çıkmış bir çılgınlık olmaktan çok uzaktı, bir milyonda bir rastlanacak bir şifreydi. Söylediklerine göre değişime direnmekle kalmıyor, meydana gelen değişikliklerin feci sonuçlarını da sınırlayarak evrimi hızlandırıyordu: Açıkır ki mutasyonlar feci sonuçlara yol açmıyorlarsa yararlı olmaları ihtimali daha fazlaydı.

Göksel bir tasarım ileri sürmeksizin optimizasyonu açıklamamanın tek yolu, seçilimin işleyişine dayanmaktır. Eğer böyleyse hayatın şifresinin evrilmiş olması gerekir. Bakteriler ve mitokondriler arasında, “evrensel” şifrede gözlenen birkaç önemsiz varyasyon, hiçbir şeyi değilse bile şifrenin en azından istisnai koşullar altında evrilebileceğini göstermektedir. Crick’le birlikte, peki ama herhangi bir sakatlamaya yol açmaksızın şifre nasıl değişir diye sorabilirsiniz. Cevap “ayrılarak”tır. Bir amino asit dört, hatta altı farklı kodonla şifreleniyorsa, bazı kodonlar diğerlerinden daha fazla kullanılacaktır. En az kullanılan kodonlar, pratikte feci sonuçlara yol açmaksızın farklı (ama muhtemelen ilişkili) bir amino aside tahsis edilebilirler. Böylece şifre evrilir.



Bir bütün olarak değerlendirildiğinde, “kodonlar içindeki şifre”, en başta biyosentez ve amino asitlerin çözülebilirliğiyle ilgili, sonradan genişleme ve optimizasyonun izlediği fiziksel bir süreçten bahseder. Mesele şudur: Seçilim en başta ne tür fiziksel süreçler üzerinde etkili olmaya başlamıştır?

Bu sorunun cevabı kesin olarak bilinmiyor, cevaplanmasının önünde de bazı engeller bulunuyor. İlk engellerden biri, DNA ve proteinleri konu alan yumurta-tavuk problemiydi. Sorun, DNA'nın az çok atıl olması ve kendi kendisini kopyalamak için özel bazı proteinlere gerek duymasında yatar. Öte yandan, bu özel proteinler şans eseri özel olmazlar, doğal seçimle evrilirler, bunun gerçekleşmesi için de yapılarının hem kalıtılabilir hem değişken olması gerekir. Proteinler kendilerinin kalıtılabilir şablonu gibi davranmazlar, DNA'yla şifrelenmişlerdir. Bu yüzden de proteinler DNA olmadan evrilemezler, DNA da proteinler olmadan evrilemez. Eğer biri diğeri olmadan evrilemiyorsa, seçim hiç başlayamaz.

Sonra 1980'lerin ortalarında RNA'nın bir katalizör olarak hareket ettiği yönündeki şaşırtıcı keşif geldi. RNA nadiren bir çifte sarmal oluşturur, genellikle karmaşık şekilleri olan küçük moleküller oluşturur, moleküllerin bu karmaşık şekilleri katalize etme işlemine yarar. Böylece RNA çemberi kırar. Varsayımsal bir “RNA dünyası”nda, RNA hem proteinlerin hem DNA'nın rolünü üstlenir, başka birçok tepkimenin yanı sıra kendi sentezini de katalize eder. Böylece birdenbire şifrenin tümüyle DNA'yla ilgili olmasına gerek kalmamıştı, şifre RNA'nın proteinlerle doğrudan etkileşimlerinden de türemiş olabilirdi.

Bu durum modern hücrelerin çalışma biçimi bakımından çok şey ifade ediyor. Bugün hücrelerde DNA ile amino asitler arasında doğrudan etkileşim yoktur, ama protein sentezi sırasında birçok temel tepkime ribozimler olarak bilinen RNA enzimleriyle hızlandırılır. “RNA dünyası” terimini, Watson'ın Harvardlı meslektaşı Walter Gilbert, *Nature* dergisinde gelmiş geçmiş en okunan makalelerden birinde geliştirmiştir. Bu fikrin, alanda şaşkınlık yaratan bir etkisi oldu, hayatın şifresi arayışı da “DNA

proteinleri nasıl şifreler?" sorusundan "RNA ile amino asitler arasında ne tür etkileşimlerin gerçekleşmiş olması gerekir?" sorusuna dönüştü. Ama cevap henüz belirginlikten uzaktır.

RNA dünyasına duyulan büyük ilgi dikkate alındığında, daha küçük RNA parçacıklarının hızlandırıcı özelliklerinin büyük ölçüde görmezden gelinmiş olması herhalde şaşırtıcıdır. Büyük RNA molekülleri tepkimeleri hızlandırabiliyorsa, daha küçük RNA parçacıklarının da (tek tek "harflerin" ya da "harf çiftlerinin") o kadar kuvvetli bir biçimde olmasa da tepkimeleri hızlandırması muhtemeldir. Amerikalı saygın biyokimyager Harold Morowitz'ın moleküler biyolog Shelley Copley ve fizikçi Eric Smith'le birlikte son dönemde yaptığı araştırmalar tam da bu olasılığı düşündürür. Fikirleri doğru olmayabilir, ama öyle sanıyorum ki hayatın şifresinin kökenini açıklamak için bu tür bir kuram aramamız gerekiyor.

Morowitz ile meslektaşları, harf çiftlerinin (teknik terimle "dinükleotidlerin") katalizör olarak davrandığını ileri sürmüşlerdi. Bir dinükleotidin pirüvat gibi bir amino asit öncülüne bağlandığını, sonra da onun bir amino aside dönüşmesini hızlandığını tasarlamışlardı. Tam olarak hangi amino asidin olduğu dinükleotidde (daha önce tartıştığımız kodondaki şifreye uygun olarak) çiftler oluşturan harflere bağlıdır. Esas itibarıyla ilk harf amino asit öncüsünü belirtir, ikinci harfse dönüşüm tipini. Örneğin bu iki harf UU'ysa pirüvat bağlanır ve hayli hidrofobik bir amino asit olan löisine dönüştürülür. Morowitz, bazı akıllıca tepkime mekanizmalarının sağlam, en azından akla yatkın kıldığı, bu hoş giden basit fikri destekliyordu, fakat ben, ileri sürülen tepkimelerin bir deney tüpünde gerçekten gerçekleştiği yolunda bazı kanıtlar görmek isterim.

Buradan üçlü bir şifreye varabilmek için, ilkesel olarak sadece iki adıma daha gerek vardır, bu adımların hiçbirisi de harflerin normal çiftler oluşturmamasından fazlasını gerektirmez. İlk adımda bir RNA molekülü standart harf eşleşmesi yoluyla iki harfli bir dinükleotide bağlanır: G ile C, A ile U bağlanır vs. Amino asit daha büyük, büyük olduğu için de çekim kuvveti daha güçlü

olan RNA'ya aktarılır.⁶ Sonuçta bir amino aside bağlı bir RNA ortaya çıkar, RNA'nın kimliği dinükleotidi oluşturan harflere bağlıdır. Ashına bakılırsa, Crick'in "adaptörlerin"nin bir prototipi, "doğru" amino asit yüklenmiş bir RNA'dır bu.

Son adımda iki harfli şifre üç harfli bir şifreye dönüşür, bu adım da yine RNA'lar arasındaki standart harf eşleşmesinden daha fazlasına dayanmayabilir. Bu gibi etkileşimler üç harfle, iki harfle olduğundan daha iyi işliyorsa (herhalde aralık daha iyi ya da bağlanma daha güçlü olduğundan) bu durumda kolayca üçlü bir şifreye geçebiliriz; bu üçlü şifrede de ilk iki harf sentezin sınırlamalarıyla belirlenir, üçüncü harfe daha sonraki bir aşamada şifrenin optimizasyonunu mümkün kılan çeşitli sınırlamalar dahilinde farklılık gösterebilir. Ben de işte tam bu noktada, Crick'in bir domuzun memelerine yapışmış domuz yavrucukları şeklinde çizdiği RNA tablosunun doğru olabileceğini sanıyorum: Mekansal sınırlamalar, ardışık RNA'ları "ortalama" üç harflik bir arayla itebilir. Dikkat edelim, henüz bir okuma çerçevesi, proteinler falan yoktur, sadece RNA'larla etkileşime giren amino asitler vardır. Ama bu şifrenin temeli zaten oturmuştur ve sonraki bir aşamada boş üçlü kodonların yakalanmasıyla yeni amino asitler eklenebilir.

Bu senaryo tamamen bir spekülasyondur, ona hiç kuşku yok, onu destekleyecek kanıtlar da henüz pek azdır. Bu senaryonun en büyük meziyeti şifrenin kökenini aydınlatması, bizi basit kimyasal ilişkilerden alıp akla yatkın, sınanabilir bir biçimde üçlü bir kodona götürmesidir. Böyle bile olsa, bütün bunların iyi güzel olduğunu, ama benim RNA'dan sanki ağaçta yetişiyormuş gibi bahsettiğimi düşünebilirsiniz. Basit kimyasal ilişkilerden proteinlerin seçilimine nasıl geçiyoruz? RNA'dan DNA'ya nasıl geçiyoruz? Bu sorulara getirilmiş, son birkaç yıl içindeki şaşırtıcı bulguların da desteklediği çarpıcı cevaplar vardır. Yeni bulgular, hayatın birinci bölümde bahsettiğimiz ortamda, hidrotermal menfezlerde evrildiği fikrini de gayet güzel desteklemektedir.



İlk soru şudur: Bütün bu RNA nereden geliyor? RNA dünyasıyla ilgili yirmi yıldır süren araştırmalara rağmen bu soru nadiren ciddi bir havada sorulmuştur. Dile getirilmeyen ve gerçekten de anlamsız olan varsayım, RNA'nın bir şekilde ilksel bir çorbanın içinde "bulunduğu" dur.

İğnelemeye çalışmıyorum. Bilimde birçok özel problem vardır, hepsi de bir seferde cevaplanamaz. RNA dünyasının muhteşem açıklayıcı gücü "verili bir duruma", RNA'nın önceden var olmasına dayanır. RNA dünyasının öncü araştırmacıları için, RNA'nın nereden geldiği önemli değildi, araştırmaların itici gücü olan soru RNA'nın ne yapabildiği idi. Hiç kuşku yok ki RNA sentezi sorunuyla ilgilenenler de vardı; ama sonu gelmez tartışmalar içinde hiziplere bölünmüşlerdi, tercih ettikleri varsayımlarla ilgili olarak kendi aralarında çekişip duruyorlardı. RNA belki dış uzayda siyanürden sentezlenmişti, belki de dünya üzerinde şimşeklerin metan ve amonyak gazlarına çarpması sonucu oluşmuştu, belki de bir volkanda budala altını üzerinde oluşmuştu. Bütün bu senaryoların bazı avantajları vardı, ama hepsi aynı temel sorundan mustarıpti: "yoğunluk problemi."

Tek tek RNA harflerini (nükleotit) oluşturmak bile zordur, ancak bu harfler, yüksek yoğunlukta bulunuyorlarsa bir polimerde (düzgün bir RNA molekülünde) birleşirler. Yığınlar halinde bulunuyorlarsa, nükleotitler kendiliğinden sıkışıp uzun zincirler oluştururlar. Ama yoğunlaşma düşükse, tam tersi olur: RNA yine kendisini oluşturan nükleotitlere ayrılır. Sorun şu ki RNA kendisini her kopyaladığında, nükleotit tüketir, yani nükleotit yoğunluğunu azaltır. Nükleotit havuzu sürekli değilse ve tükendiğinden hızlı yenilenmezse, RNA dünyası bütün açıklayıcı gücüne rağmen hiç işleyemez. Bu hiç gerçekleşmezdi. Bu yüzden de üretken bilimle ilgilenmek isteyenler için RNA'yı verili almak en iyisiydi.

Böyle yapmakta haklı çıktılar, çünkü cevap uzun zamandır pişiyordu, hatta dramatik bir biçimde meydana çıkıyordu. RNA'nın ağaçlarda yetişmediği doğrudur, ama menfezlerde, ya da en azından simüle edilmiş menfezlerde ortaya çıkabilir. Yorul-

mak bilmez jeokimyager Mike Russell (kendisiyle birinci bölümde tanışmıştık), Dieter Braun ve Almanya'daki meslektaşlarıyla birlikte yaptığı çalışmalar sonucu 2007'de kaleme aldığı önemli bir kuramsal makalede, menfezlerde nükleotit birikiminin uç düzeylere çıkabileceğini belirtiyordu. Bunun sebebi, menfezlerde gelişen güçlü termal kademelerle ilgilidir. Birinci bölümden hatırlayacaksınız, bazik hidrotermal menfezler birbiriyle bağlantılı gözeneklerle doludur. Termal kademeler, bu gözeneklerin arasından geçen iki tip akım yaratır: kaynayan bir su ısıtıcısında olduğu gibi konveksiyon akımları ve termal yayılma (ısının daha serin sulara kaçması). Bunların arasında bu iki termal akım yavaş yavaş daha alçaktaki gözenekleri nükleotitler de dahil birçok küçük molekülle doldurur. Russell ve meslektaşlarının simüle edilmiş hidrotermal sisteminde, nükleotitlerin yoğunluğu başlangıç düzeyinin binlerce, hatta milyonlarca katına ulaşmıştı. Bu kadar üst düzeylerde nükleotitler gayet rahat şekilde sıkışıp RNA ya da DNA zincirleri oluşturabilirler. Yazarların vardığı sonuca göre, bu koşullar "hayatın moleküler evrimi için yoğunluğun yüksek olduğu, ikna edici bir başlangıç noktası" sunar.

Ama menfezlerin yapabileceği şeyler bundan ibaret değildir. Kuramsal olarak, daha uzun RNA ve DNA molekülleri birikerek tek tek nükleotitlerden daha yüksek düzeylerde bir yoğunluğa çıkabilirler: Daha büyük boyutlu olmaları gözenekleri doldurmalarını daha muhtemel kılar. 100 harf çiftinden oluşan DNA moleküllerinin birikerek inanılmaz düzeylere çıktığı, başlangıçtaki yoğunluğun milyon kere milyar katına (10^{15} katına) ulaştığı tahmin edilmektedir. Bu gibi yüksek konsantrasyonlar prensipte, tartışmakta olduğumuz her tür etkileşimi (RNA moleküllerinin birbirlerine bağlanmalarını vs.) mümkün kılar. Daha da iyisi, ısıdaki salınımlar (termal dolaşım) yaygın laboratuvar tekniği PCR'la (polimeraz zincir tepkimesi) aynı şekilde RNA kopyalamasını teşvik eder. PCR'da yüksek ısılar DNA'yı çözer, onun bir şablon gibi davranmasını sağlar, daha düşük ısılarda yoğunlaşma ise tamamlayıcı sarmalın polimer haline gelmesini mümkün kılar. Sonuç, kopyalanmanın üstel hızlara ulaşmasıdır.⁷

Hepsi bir arada ele alındığında, termal kademelerin menfezlerde tek tek nükleotitleri aşırı düzeylerde yoğunlaştırması, RNA oluşumunu teşvik edecektir. Sonra aynı kademeler, RNA'yı yoğunlaştıracak, moleküller arasında fiziksel etkileşimleri teşvik edecektir. Son olarak ısıdaki salınımlar RNA kopyalamasını teşvik edecektir. İlksel RNA dünyası için daha iyi bir ortam hayal etmek zordur.

Peki ya ikinci sorumuz: RNA'ların kopyalanmasından, kendi aralarında rekabet etmesinden çıkıp RNA'nın proteinleri şifrelemeye başladığı daha incelikli bir sisteme nasıl geçeriz? Burada da yine cevabı menfezler verebilir.

RNA'yı ham maddeler ve enerjiyle (ATP olarak) bir deney tüpüne koyun, kendisini kopyalayacaktır. Aslında sadece kopyalamakla kalmaz, moleküler biyolog Sol Spiegelman ve diğerlerinin 1960'larda keşfettiği üzere, *evrilecektir*. RNA, deney tüpünde kuşaklar boyunca kopyalamada giderek hızlanır, nihayetinde canavarca etkili bir hal alır. Spiegelman'ın canavarına dönüşür: Kopyalanarak her yere yayılan, sadece en yapay, en taşkın varoluşa haiz bir RNA sarmalı. İlginçtir, başlangıç noktasının neresi olduğu önemli değildir. Bir virüsle de başlayabilirsiniz, yapay bir RNA'yla da. Hatta bir nükleotit karışımı ve onları birleştirecek bir polimerazla da başlayabilirsiniz. Nereden başlarsanız başlayın, her zaman aynı "canavar"a, çılgınca kopyalanan sadece 50 harf uzunluğundaki RNA sarmalına varma eğilimi söz konusudur. Spiegelman'ın canavarı. Moleküler bir *Groundhog Day*.*

Mesele şudur ki Spiegelman'ın canavarı daha karmaşık bir hal almaz. 50 harf uzunluğuna varmasının sebebi, onsuz sarmalın kendi kendisini kopyalayamayacağı kopyalama (replikaz) enziminin bağlama diziliminin bu olmasıdır. RNA burnunun ucunu göremez ve bir solüsyonda asla karmaşıklık yaratmayacaktır. Peki RNA kendi kopyalama hızı pahasına nasıl ve neden proteinleri şifrelemeye başlamıştır? Bu döngüden çıkmanın tek yolu, seçilimin "daha yüksek bir düzey"de gerçekleşmesidir; RNA'nın, bugün seçilimin gerçekleştiği birim olan daha büyük

* Amerika Birleşik Devletleri ve Kanada'da 2 Şubat'ta kullanan bayram. —yn.

bir oluşumun, örneğin bir hücrenin bir parçası olmasıdır. Sorun şudur ki bütün organik hücreler evrim olmaksızın birden varlık bulamayacak kadar karmaşıktır, bu da demek oluyor ki RNA'nın kopyalama hızının seçilmesi yerine bir hücreyi oluşturan özelliklerin seçilmesi gerekir. Bu da tıpkı DNA-protein döngüsü gibi yumurta-tavuk durumudur, ama onun kadar bilinmez.

RNA'nın DNA mı proteinden, protein mi DNA'dan döngüsünü gayet güzel kıldığını görmüştük, peki ya seçim döngüsünü ne kırar? Cevap doğruca gözümüzün için bakmaktadır: Hidrotermal menfezlerde hazır bulunan inorganik hücreler. Bu gibi hücreler organik hücrelerle aynı büyüklüktedirler, faal menfezlerde her zaman oluşurlar. Dolayısıyla bir hücrenin içeriği, kendi kendilerini kopyalamak için gerekli hammaddeleri yeniden üretmekte özellikle iyiyse, hücreler kendilerini kopyalamaya başlar, yeni yeni inorganik hücreler çıkartırlar. Kendilerini olabildiğince hızlı kopyalayan "bencil" RNA'larsa geride kalmaya başlar, çünkü kendi kopyalanmalarını devam ettirecek hammaddeleri yeniden üretmeyi başaramazlar.

Başka bir deyişle, menfez ortamında, seçim yavaş yavaş tek tek RNA moleküllerinin kopyalanma hızından, tek tek birimler olarak davranan hücrelerin genel "metabolizması"na geçer. Ve metabolizmanın efendileri de her şeyden önce proteinlerdir. Proteinlerin nihayetinde RNA'nın yerini alması kaçınılmazdı. Ama proteinler de birden ortaya çıkmamıştır; büyük ihtimalle mineraller, nükleotitler, RNA'lar, amino asitler ve moleküler kompleksler (örneğin RNA'ya bağlanan amino asitler), hepsi de prototip metabolizmaya katkıda bulunmuşlardır. Burada asıl önemli olan nokta, moleküller arasında basit ilişkiler olarak başlayan şeyin, bu doğal olarak yayılan hücreler dünyasında bir bütün olarak hücre içeriklerini yeniden üretme becerisinin seçilimi haline gelmiş olmasıdır. Önce öz yeterlilik için, nihayetinde de özerk varlık için seçim haline gelmiştir. Ironiktir, bugün hücrelerin özerk varoluşlarında DNA'nın kökenine dair son ipucunu buluyoruz.



Bakteriler arasında derin bir ayrışma vardır. Bu ayrışmanın bizim evrimimiz açısından büyük önemini dördüncü bölümde değerlendireceğiz. Şimdilik bu ayrışmanın sadece DNA'nın kökenini üzerinde, başlı başına yeterince derin olan etkileri üzerinde duracağız. Ayrışma öbakterilerle ("eu" Yunanca "gerçek, asıl" anlamına gelir) neresinden bakarsanız bakın onlara tıpatıp benzeyen ikinci bir grup arasındadır. Bu ikinci grup, arkebakteriler ya da arkea olarak bilinir. İsimleri, hayli arkaik, yani antik oldukları fikrinden gelmektedir, gerçi onların gerçek bakterilerden daha yaşlı olduğuna inananların sayısı bugün pek azdır.

Aslına bakarsanız, inanılmazın sınırına yaklaşan bir şans eseri hem bakteriler hem de arkea aynı hidrotermal tepede oluşmuş olabilir. Protein sentezlerindeki birçok ayrıntının yanı sıra genetik şifrelerinin de aynı olmasını bundan başka pek az şey açıklayabilir. Ama belli ki DNA'larını kopyalamayı, tümüyle bağımsız bir biçimde daha sonra öğrenmişlerdir. DNA ve genetik şifre hiç kuşku yok ki bir kez evrilmiş olsa da, DNA kopyalaması (bütün canlı hücrelerde kalıtımın fiziksel mekanizması) öyle görünüyor ki iki kez evrilmiştir.

Böyle bir iddia Eugene Koonin gibi birinden (ABD'de Ulusal Sağlık Enstitüleri'nde çalışan titiz ve entelektüel Rus-Amerikalı bir hesaplamalı genetikçi) gelmemiş olsaydı, şüphe payı bırakmamızı isterdim. Ama Koonin ve meslektaşları radikal bir kavrayışı kanıtlamaya soyunmamışlardı, bakteriler ve arkeada DNA kopyalamasıyla ilgili sistematik bir araştırma sırasında bu kavrayışa rastlamışlardı. Koonin ve meslektaşları, ayrıntılı gen dizilimi karşılaştırmaları sonucu bakteriler ve arkeanın aynı protein sentez mekanizmalarını paylaştığını buldu. Örneğin DNA'nın okunup RNA'ya çevrilmesi, RNA'nın da proteinlere çevrilmesi temelde ikisinde de aynıydı, bakteriler de arkea da gen dizilimlerinden anlaşıldığı üzere ortak bir atadan miras aldıkları açık olan enzimler kullanıyordu. Ama DNA kopyalaması için gerekli enzimler açısından durum böyle olmaktan çok uzaktır. Bu enzimlerin çoğunun hiçbir ortak noktası yoktur. İşlerin böyle ilginç bir hal göstermesi, sadece bakteriler ve arkeanın derindeki

ayrışmasıyla açıklanabilir, ama bu durumda DNA'nın okunması ve çevrilmesinde gözlenen aynı ölçüde derin ayrışma, neden böyle kesin bir farklılığa yol açmamıştır sorusuyla karşılaşırız. Koonin'in radikal varsayımı, bu soruya getirilebilecek en basit açıklamadır: DNA kopyalaması iki kez evrilmiştir, bir kez arkeada, bir kez de bakterilerde.⁸

Böyle bir iddia birçok kişiye çirkin görünebilir, ama Almanya'da çalışan parlak ve "tatlı sert" bir Teksaslı için doktorun salık verdiği şey buydu. Birinci bölümde tanışmış olduğumuz biyokimyager Bill Martin'in hidrotermal menfezlerde biyokimyanın kökenlerini araştırmak üzere Mike Russell'la bir araya geldiğini görmüştük. Martin ve Russell 2003'te, genel kabul gören bilgilerin suratına çarparcasına, kendi varsayımlarını kaleme aldılar: Bakteriler ve arkeanın ortak atası serbest canlı bir organizma değildi, gözenekli kayalara hapsolmuş avam bir kopyalayıcıydı: Hidrotermal yığınları dolduran mineral hücrelerinden henüz kaçamamıştı. Martin ile Russell bakteriler ve arkea arasındaki başka derin farklılıkların da bir listesini sunmuşlardı. Özellikle hücre zarları ve duvarları tümüyle birbirinden farklıydı, bu da iki grubun aynı kayalıklarda bağımsız olarak ortaya çıktığı anlamına geliyordu. Bu varsayım birçokları için çok radikal, ama Koonin'e göre kendi gözlemlerine tümüyle uyuyordu.

Çok geçmeden Koonin ve Martin hidrotermal menfezlerde genler ve genomların kökenini değerlendirmek üzere kafa kafaya verdiler, bu konu hakkında hareketlendirici düşünceleri 2005'te yayınladılar. Mineral hücrelerin "hayat döngüsü"nü HIV gibi modern retrovirüslere benzeyebileceğini ileri sürüyorlardı. Retrovirüslerin DNA yerine RNA'yla şifrelenmiş küçük bir genomu vardır. Bir hücreyi işgal ettiklerinde, "ters transkriptaz" (reverse transcriptase) denilen bir enzimi kullanarak RNA'larını DNA'ya kopyalarlar. Yeni DNA önce ev sahibi hücrenin genomuna dahil olur, sonra ev sahibi hücrenin kendi genleriyle birlikte okunur. Yani virüs kendi kendisinin kopyalarını üretirken, DNA'dan çalışır; ama kendisini yeni kuşak için hazırlarken, kalıtsal bilginin aktarılması için RNA'ya dayanır. Dikkat çekicidir ki retrovirüste

eksik olan şey DNA kopyalama becerisidir, bu genelde çok sayıda enzim gerektiren hantal bir süreçtir.

Böyle bir hayat döngüsünün hem avantajları hem dezavantajları vardır. Hız büyük bir avantajdır. Ev sahibi hücrenin mekanizmasını DNA'yı RNA'ya çevirmek, RNA'yı da proteinlere çevirmek için işgal eden retrovirüsler çok sayıda gene sahip olma ihtiyacından kurtulmuşlar, böylece epeyce zaman kazanmışlar ve büyük dertlerden uzaklaşmışlardır. Büyük dezavantajlarıysa varoluşları için tümüyle "uygun" hücrelere bağımlı olmalarıdır. O kadar belirgin olmayan ikinci dezavantajsa RNA'nın bilgi depolama bakımından DNA'ya kıyasla zayıf olmasıdır. RNA kimyasal olarak DNA kadar istikrarlı değildir, bu demek oluyor ki tepkimelere girmeye DNA'nın olduğundan daha hazırdır. Zaten RNA biyokimyasal tepkimeleri bu şekilde hızlandırır. Ama bu tepkimeye hazır olma hali, büyük RNA genomlarının istikrarsız olduğu ve kırıldığı anlamına gelir, bu durum da bir büyüklük sınırlaması dayatır, bağımsız olarak var olmak için gereken epeyce altında kalan bir sınırdır bu. Bir retrovirüs aslında RNA'yla şifrelenmiş bir varlığın olabileceği kadar karmaşıktır neredeyse.

Ama mineral hücrelerinde değil. Mineral hücreleri, daha karmaşık RNA hayat biçimlerinin evrilmesini sağlayan iki avantaj sunar. Bu avantajların ilki, bağımsız bir varoluş için gerekli özelliklerin birçoğunun menfezlerde serbestçe sunuluyor, hücrelere bir başlangıç yapma imkanı tanınıyor olmasıdır. Yayılan mineral hücreleri zaten kapsayıcı zarlar, enerji vs. sunuyordur. O halde bir anlamda, menfezleri dolduran, kendi kendilerini kopyalayan RNA zaten "viral"dir. İkinci "avantaj"sa RNA sürülerinin birbirlerine bağlı hücrelerde sürekli karışıyor ve eşleşiyor olmasıdır, iyi "işbirliği yapan" gruplar yeni oluşan hücrelere birlikte yerleşerek yayılmaları halinde bir arada seçilebilirler..

Martin ve Koonin, işbirliğine yatkın RNA popülasyonlarının mineral hücrelerde ortaya çıktığını, her RNA'nın ilgili bir avuç geni şifrelediğini tasavvur ediyordu. Bu düzenlemenin dezavantajı, RNA popülasyonlarının farklı, muhtemelen uygun olmayan

kombinasyonlarla yeniden karışmaya duyarlı olmalarıydı. Bir grup işbirliğine yatkın RNA'yı tek bir DNA molekülüne dönüştürmüş, böylece kendi "genomu"nu bir arada tutmayı başarabilmiş bir hücre, bu durumun bütün avantajlarına sahip olacaktı. Kopyalanması bir retrovirüsün kopyalanmasına benzeyecekti. DNA'sı, bitişik hücrelere bulaşan ve onlara bilgileri yine bir DNA bankasına depolama becerisini kazandıran RNA sürüsüne yazılacaktı. Her yeni RNA akışı bankada yeniden yazılacaktı, böylece hatalarla dolu olma ihtimali de daha az olacaktı.

Bu gibi koşullarda mineral hücrelerin DNA'yı icat etmeleri ne kadar zor olurdu? Muhtemelen o kadar zor olmazdı, aslında yeni bir (RNA yerine) DNA kopyalama sistemi icat etmekten çok daha kolay olurdu. RNA ile DNA arasında iki küçük farklılık vardır, ama bunlar bir araya geldiklerinde muazzam bir yapısal farklılığa yol açar: RNA'nın bukleler oluşturan, katalitik (hızlandırıcı) molekülleriyle DNA'nın artık simgeleşmiş (Crick ile Watson'ın *Nature*'da 1953'te yayınlanan makalelerinde ikinci derecede önemli bir tahmin olarak sundukları) çifte sarmal arasındaki farka.⁹ Bu küçük farklılıkların ikisinin de menfezlerde neredeyse kendiliğinden gerçekleşmesini engellemek zor olurdu. İlki, RNA'dan (ribonükleik asit) tek bir oksijen atomunun alınıp RNA'nın DNA'ya (deoksi-ribonükleik asit) dönüştürülmesidir. Bugün bu mekanizma hâlâ menfezlerde bulunan türden tepkimeye hazır araçları (teknik terimle serbest radikalleri) gerektirir. İkinci farklılık, urasil harfine (U) bir "metil" (CH_3) grubunun eklenmesiyle ortaya timinin çıkmasıdır. Yine, metil grupları, metan gazından çıkmış, tepkimeye girmeye hazır serbest radikallerdir, bazik menfezlerde bol bol bulunurlar.

Yani DNA yapımı nispeten kolay olmuş olabilir: DNA menfezlerde RNA'dan "kendiliğinden" oluşmuş olsa gerektir. (Demek istediğim, DNA'nın basit öncüllerden oluşumunu mineraler, nükleotitler, amino asitler vs. hızlandırmış olsa gerektir.) Biraz daha zor bir numara, şifrelenmiş mesajın korunması olurdu, bu da RNA'daki harflerin diziliminin DNA biçiminde eksiksiz bir kopyasının yapılması anlamına gelir. Ama burada da boşluk aşı-

maz değildir. RNA'nın DNA'ya çevrilmesi bir tek enzim gerektirir: Bugün HIV gibi retrovirüslere emanet edilmiş olan bir ters transkriptaz gerektirir. Moleküler biyolojinin temel dogmasını (DNA yapar RNA yapar protein) "kıran" enzimin viral RNA'yla dolu gözenekli bir kayayı bugün bildiğimiz biçimiyle hayata çeviren enzim olması ne kadar ironiktir! Hücrelerin doğuşunu bile bu mütevazı retrovirüse borçlu olabiliriz.

Bu hikayede anlatılmamış çok şey vardır, birçok bulmaca, en azından bana bir şeyler ifade edecek bir hikaye inşa etme çabası içinde es geçilmiştir. Burada tartıştığımız bütün kanıtların kesin olduğunu ya da derin geçmişimize dair ipuçlarından öteye geçtiğini söyleyemem. Ama bunlar, doğru olduğu anlaşılan kuramın açıklaması gereken gerçek ipuçlarıdır. Hayatın şifresinde gerçekten örüntüler, hem kimyanın hem seçilimin işlediğini düşündüren örüntüler vardır. Derin okyanus menfezlerindeki termal akıntılar gerçekten de nükleotitleri, RNA ve DNA'yı yoğunlaştırır, menfezleri dolduran mineral hücrelerini ideal bir RNA dünyasına çevirir. Ve arkea ile bakteriler arasında gerçekten de derin, el sürçmesi diyerek açıklayamayacağınız farklılıklar vardır.

Burada aydınlatmaya çalıştığımız hikayenin doğru olabilecek olması beni gerçekten heyecanlandırıyor, ama zihnimin arkasında derin bir belirsizlik bulunuyor: Hücresel hayatın derin okyanus menfezlerinde iki kez ortaya çıkmış olması ihtimali. Kaynaşan RNA'lar yakınlardaki menfezlere bulaşmış, nihayetinde okyanusun geniş alanlarını ele geçirmiş, seçilimin küresel bir ölçekte gerçekleşmesini mi sağlamıştı? Yoksa belli bir menfez sistemi açısından benzersiz bir elverişli ortam yaratan, böylece bu sistemin atipik koşullarının hem arkeaya hem bakterilere zemin hazırlamasını sağlayan bir şey mi vardı? Herhalde bunu hiç bilemeyeceğiz, ama şansın ve zorunlulukların devreye girmesi ihtimali herkesi biraz durdurup düşündürmeli.

Fotosentez

Güneşin Çağrısı



Fotosentezin olmadığı bir dünya düşünün. Bir kere yeşil olmazdı. Zümrüt yeşili gezegenimiz bitkilerin ve alglerin, nihayetinde onların fotosentez için ışık soğuran yeşil pigmentlerinin ihtişamını yansıtıyor. Pigmentler arasında ilki, bir ışık huzmesini alıp bir kimyasal enerji kuantumuna çeviren, hem bitkilerin hem hayvanların hayatlarının itici gücü olan, klorofil dediğimiz muhteşem enerji dönüştürme sistemidir.

Fotosentez olmasaydı dünya herhalde mavi de olmazdı, çünkü göklerin ve okyanusların maviliği göklerin ve suların tertemiz, oksijenin temizleyici gücüyle kirlerinden paslarından arınmış olmalarına dayanır. Fotosentez olmasaydı serbest oksijen olmazdı.

Aslında okyanuslar da olmayabilirdi. Oksijen olmasaydı, ozon olmazdı; ozon olmasaydı morötesi ışınların yakıcı yoğunluğunu kesecek pek bir şey olmazdı. Morötesi ışınlar suyu oksijene ve hidrojene ayrıştırır. Oksijen ancak yavaş yavaş oluşabilir ve havada hiç birikmez, onun yerine kayalardaki demirle tepkimeye girer ve onlara paslı kırmızı bir renk verir. Gazların en hafifi olan hidrojen de kütleçekimin kollarından kaçır ve uzaya doğru yol alır. Bu süreç belki yavaştır, ama kaçınılmazdır; okyanuslar uzaya akar. Morötesi ışınımı Venüs'ün okyanuslarına mal

olmuştur, belki Mars'ınkilere de.

Bu demek oluyor ki fotosentezin olmadığı bir dünya tasavvur etmek için çok büyük bir hayal gücüne ihtiyacımız yok: Mars'a çok benzerdi; okyanusları olmayan, açık bir hayat işaretinin görülmediği kırmızı, tozlu bir yer olurdu. Elbette ki fotosentezsiz hayat vardır, birçok astrobiyolog da Mars'ta fotosentezsiz hayat aramaktadır. Ama yüzeyin altında saklı ya da bir buz dağına gömülmüş birkaç bakteri bulunsa da, gezegen ölüdür. Neredeyse mükemmele yakın bir denge içindedir, ataletin su götürmez bir işaretidir bu. Gaia'yla asla karıştırılamaz.

Oksijen gezegenlerdeki hayatın anahtarıdır. Fotosentezin atık bir ürünü olmaktan öteye gitmeyen oksijen gerçekten de dünyayı yapan moleküldür. Fotosentezle o kadar hızlı serbest bırakılır ki nihayetinde bir gezegenin onu yutma kapasitesine baskın çıkar. Sonunda kayalardaki bütün toz ve bütün demir, denizlerdeki bütün sülfür ve havadaki bütün metan oksitlenir, serbest oksijen havaya ve okyanusa akar. Buralara vardığında da gezegenden su kaybına son verir. Sudan kurtulan hidrojen, yolunu bulup uzaya çıkmadan önce kaçınılmaz olarak bir başka oksijen molekülüne rastlar. Onunla hızla tepkimeye girerek yine su oluşturur ve bu su göklerden yağmur olarak yağar, okyanusların kaybını durdurur. Oksijen havada biriktiğinde de morötesi ışınların kavurucu yoğunluğunu engelleyen ve dünyayı daha yaşanabilir bir yer haline getiren bir ozon kalkanı oluşur.

Oksijen bir gezegenin hayatını kurtarmakla kalmaz: Bütün hayata enerji verir ve onu büyütür. Bakteriler oksijensiz pekala yaşayabilirler, benzersiz bir elektrokimya becerileri vardır, birazcık enerji toplayabilmek için tepkimeye girebilecek her şeyle etkileşime girerler. Ama fermentasyondan ya da metan ve sülfat gibi iki molekülün tepkimeye girmesinden alınabilecek toplam enerji, oksijenli solunumun (kelimenin tam anlamıyla besinlerin oksijenle yakılmasının, oksitlenip tamamen karbondioksit ve su buharına çevrilmesinin) gücüne kıyasla ihmal edilebilecek boyutlardadır. Başka hiçbir şey çok hücreli hayatın taleplerini besleyecek enerjiyi karşılayamaz. Bütün hayvanlar, bütün

bitkiler, algler, mantarlar, hepsi de en azından hayat döngülerinin bir kısmı için oksijene bağımlıdır. Bildiğim tek istisna, Karadeniz'in oksijenden yoksun durgun derinliklerinde bir şekilde yaşayıp giden mikroskobik boyutlarda (ama çok hücreli) bir nematottur. Serbest oksijenin olmadığı bir dünya, en azından tek tek organizmalar düzeyinde mikroskobik ölçektir.

Oksijen başka biçimlerde de boyut büyüklüğüne katkıda bulunur. Bir besin zincirini düşünün. En tepedeki yırtıcılar daha küçük hayvanları yer, onlar böcekleri, böcekler daha küçük böcekleri, onlar da mantarlar ya da yaprakları yer. Bir besin ağında beş ya da altı düzey bulunması olağandışı bir durum değil. Her aşamada enerji israf olur, çünkü solunumun hiçbir biçimi %100 verimli değildir. Aslına bakarsanız, oksijenli solunum yaklaşık %40 verimlidir, solunumun başka biçimlerinin çoğu (oksijen yerine demir ya da sülfür kullanılması örneğin) %10'dan daha az verimlidir. Bu da oksijen kullanmaksızın, mevcut enerjinin sadece iki düzeyde baştaki girdinin %1'ine indiği, oksijen kullanıldığında aynı noktaya varmanın altı düzey sürdüğü anlamına gelir. Bu da demektir ki uzun gıda zincirleri ancak oksijenli solunumla mümkün olur. Gıda zincirinin ekonomisi, avcılarının oksijenli bir dünyada iş görebileceği, ama bir hayat tarzı olarak avlanmanın oksijensiz dünyada bir getirisi olmayacağı anlamına gelir.

Avlanma elbette ki boyutu artırır, avcı ile av arasında bir silahlanma yarışı başlatır. Kabuklar dişlerle savaşır, kamuflaj gözü yanılır; büyüklük hem avcının hem avlananın gözünü korkutur. O halde oksijen sayesinde, avlanmanın getirisi olur, avcılar açısından da büyüklüğün getirisi olur. Yani oksijen büyük organizmaları yaşayabilir kılmakla kalmaz, mümkün de kılar.

Ayrıca organizmaların inşa edilmesini sağlar. Hayvanlara kas güçlerini veren protein, kolajendir. İster kemiklerde, dişlerde ve kabukta kemikleşmiş olsun ister ligamentlerde, kirişlerde, kırkırdak ve deride "çıplak" halde olsun, bütün bağ dokuların başlıca proteini kolajendir. Kolajen, memelilerde açık arayla en bol bulunan proteindir, bedendeki toplam proteinin yüzde 25 gibi dikkat çekici bir bölümünü oluşturur. Omurgalı hayvanlar dışında

kolajen tırnakların, deniz canlılarındaki kabukların, kara canlılarındaki kalın zırhların, her tür lifli dokunun da kilit önemde bir bileşenidir, bütün hayvanlar aleminin “zamkı”dır. Kolajen, ardışık protein lifleri arasında bağlar oluşturmak için serbest oksijene ihtiyaç duyan olağandışı bazı yapı taşlarından oluşur, bu da bütün yapıya yüksek bir gerilim gücü verir. Serbest oksijene gerek duyulması, kabuklar ya da güçlü iskeletlerle korunan büyük hayvanların ancak atmosferdeki oksijen düzeyi kolajen üretimini destekleyecek kadar yükseldiğinde evrilebileceği anlamına gelir. Fosil kayıtlarında büyük hayvanların 550 milyon yıl önce Kambriyen Çağı’nın başında, atmosferdeki oksijende büyük bir küresel artış olmasından kısa süre sonra birden belirmesine katkıda bulunmuş olabilecek bir etkidir bu.

Kolajen üretimi için oksijen ihtiyacı bir tesadüften başka bir şey gibi görünmeyebilir: Kolajen yoksa neden serbest oksijene gerek duymayan başka bir şey ortaya çıkmamıştır? Oksijen güç vermek için gerekli midir yoksa bir kez işe dahil olmuş sonra da ebediyen reçetenin bir parçası olarak kalmış rastgele bir bileşen midir? Bunu gerçekten bilmiyoruz, ama uzun bitkilerin, yapısal desteklerini sağlayan oduna esnek gücünü kazandıran, son derece kuvvetli bir polimer olan lignini (odun özü) oluşturmak için serbest oksijene ihtiyaç duyduklarını biliyoruz. Lignin kimyasal olarak şans eseri bir biçimde, zincirler arasında güçlü bağlantılar kurmak için serbest oksijeni kullanarak oluşur. Bu bağları koparmak çok zordur, işte bu yüzden odun o kadar güçlüdür ve çürümesi uzun zaman alır. Ağaçlardan lignini çıkarın (ki bu kağıt üreticilerinin denediği bir numaradır, çünkü kağıt yapabilmek için ağaç lapasından lignini titizlikle çıkarmaları gerekir) ağaçlar en ufak bir esintide bile kendi ağırlıklarını taşıyamaz, yere çöküverirler.

Öyleyse oksijen olmasaydı, büyük hayvanlar ya da bitkiler, avlanma, mavi bir gökyüzü, muhtemelen okyanuslar olmazdı, herhalde toz ve bakteriler dışında hiçbir şey olmazdı. Oksijen hiç kuşkusuz düşünebileceğimiz en değerli atıktır. Ama atık bir ürün olmakla kalmaz, aynı zamanda olağandışı bir atıktır. Fo-

tosentez burada, dünyada hiç serbest oksijen üretmeksizin evrilmiş olabilirdi; Mars'ta ya da evrenin başka herhangi bir yerinde bu şekilde evrilmesi de hayli mümkündür. Böyle bir durum, herhangi bir hayatı bakterilerin karmaşıklık düzeyine hapseder, bizlerse bir bakteriler evrenindeki tek bilinçli varlıklar olarak bir başımıza kalırız.



Oksijenin havada hiç birikmeyebilecek olmasının bir nedeni de solunumdur. Fotosentez ve solunum eşit ve karşıt süreçlerdir. Kısaca ifade edecek olursak, fotosentez ihtiyaç duyulan enerjiyi sağlamak için güneş ışığını kullanarak iki basit molekülden, karbondioksit ve sudan, organik moleküller yapar. Solunum ise tam tersini yapar. Organik molekülleri (besin) yakar ve havaya karbondioksit ve su bırakırız; salınan enerji de hayatlarımızın itici gücü olur. Bizim bütün enerjimiz, besinlerdeki mahkumiyetinden kurtarılmış gün ışığıdır.

Fotosentez ve solunum sadece kimyalarının ayrıntıları açısından değil, küresel muhasebe bakımından da birbirlerine karşıt-ırlar. Solunum hiç olmasaydı (bitkisel gıdaları yakan hayvanlar, mantarlar, bakteriler hiç olmasaydı) bütün karbondioksit uzun zaman önce atmosferden çekilmiş, biyokütleye dönüşmüş olurdu. O zaman da her şey az çok durma noktasına gelmiş olurdu, yavaş yavaş çürüme ya da yanardağlar tarafından serbest bırakılan azıcık karbondioksit salımı dışında. Ama gerçekte olanlar bundan çok uzaktır. Gerçekte olan şey, solunumun, bitkilerin ortaya çıkardığı organik moleküllerin tamamını yakmasıdır: Jeolojik bir zaman çerçevesiyle bakıldığında, bitkiler bir "püf"le ortadan kaybolmaktadır. Bunun derin bir sonucu vardır. Fotosentez yoluyla havaya bırakılan oksijenin tamamı solunumla tekrar alınır. Uzun vadeli, değişmez, sonu gelmez bir denge söz konusudur; bir gezegen için ölüm öpücüğüdür bu. Bir gezegenin oksijenli bir atmosfer kazanmasının, Mars'ın tozlu kırmızı akıbetinden kurtulmasının tek yolu, küçük bir bitkisel maddenin bozulmadan kalması, hayatın o bitkiyi enerji almak için parça-

lamanın bir yolunu bulma dehasından korunmasıdır. Gerekirse bitki gömülmelidir.

Ve gömülmüştür de. Korunmuş olan bitkisel madde kömür, petrol, doğal gaz, is ve toz olarak dünyanın derinlerindeki kayalara gömülmüştür. Dünyanın kabuğunda, canlı biyosferin tamamında olduğundan 26.000 kat daha fazla “ölü” organik karbon bulunduğu sanılmaktadır. Karbonun her bir atomu, havadaki bir oksijen molekülünün antitezidir. Fosil yakıt olarak kazdığımız ve yaktığımız her karbon atomu için havadan bir oksijen molekülü eksilir, karbondioksit çevrilir ve bunun iklim açısından ciddi, ama öngörülemez sonuçları vardır. Talihe bakın ki iklim açısından büyük sıkıntılar yaratsak bile, dünyanın oksijen kaynaklarını fosil yakıt yakarak asla eritemeyiz: Organik karbonun büyük bölümü, killi şist gibi kayalarda mikroskobik döküntüler halinde gömülüdür; insan sanayiinin, en azından ekonomik sanayiinin erişemeyeceği durumdadır. Şimdiye kadar bilinen bütün fosil yakıt rezervlerini yakma yönündeki kibirli çabamıza rağmen, havanın oksijen içeriğini ancak milyonda iki ya da üç, yani yüzde 0,001 azaltmış bulunuyoruz.¹

Ama bu gömülü organik karbon rezervleri sürekli oluşmazlar, jeolojik çağlar boyunca kesintilerle gömülmüşlerdir. Kural, solunumun fotosentezi sildiği (erozyonun herhangi bir höyüğü sildiği gibi) kesin bir dengeye çok yakındır, bu yüzden de net gömülme hiçe yakındır. Oksijen düzeyinin on milyonlarca yıldır yaklaşık %21 civarında seyretmesinin sebebi budur. Ama derin jeolojik zamanda, ender rastlanan durumlarda, işler çok farklıydı. Herhalde bunun en çarpıcı örneği 300 milyon yıl önceki Kömür Çağı’dır, o zamanlar havada martı büyüklüğünde yusufçuklar uçuşuyor, bitki örtüsünde bir metre uzunluğunda kırkayaklar sürünüyordu. Bu devler varlıklarını Kömür Çağı’nda karbon gömülme hızının son derece yüksek olmasına borçluydular, bu çağ adını devasa kömür rezervlerinden almıştı. Karbon kömür bataklıklarının altına gömülü olduğundan, oksijen düzeyi yüzde 30’larda seyrediyordu. Böylece bazı yaratıklar normal büyüklük sınırlarını çok aşacak şekilde büyüme fırsatı buldu, özellikle de

ciğerlerle faal olarak nefes almak yerine, yusufçuk gibi gazların tüplerden ya da deri üzerinden edilgin bir biçimde nüfuzuyla soluyan hayvanlar.²

Kömür Çağı'nda gömülü karbonun görülmemiş boyutlara ulaşmasının ardında ne vardı? Bu durumun çok çeşitli tesadüfi etkenlere dayandığı neredeyse kesindir: kıtaların dizilimi, nemli iklim, büyük sellerle oluşmuş düzlükler, ama herhalde en önemlisi, kara kütlesinin geniş alanlarına yayılma becerisine sahip büyük ağaçların ve güçlü bitkilerin doğmasını mümkün kılan ligninin evrimi. Bugün bile mantarlar ve bakteriler tarafından kırılması zor olan lignin, görünüşe bakılırsa evriminden kısa süre sonra aşılabilir bir engel haline gelmiştir. Enerji için kırılmıyordu, o yüzden de geniş ölçekte bozulmadan gömülü kalıyor, antitezi oksijen de havayı dolduruyordu.

Jeolojik tesadüfler, bundan başka iki kez daha bir araya gelerek oksijen düzeyini artırdılar; herhalde bunların ikisi de "kartopu dünya" denilen küresel buzullaşmanın sonucuydu. Oksijen seviyesinde, yaklaşık 2 milyar 200 milyon yıl önce gözlenen ilk büyük artış, o tarihlerde yaşanan bir jeolojik altüst oluş ve küresel buzul çağı'nın hemen ardından ortaya çıkmıştı; yaklaşık olarak 800 ila 600 milyon yıl önceki ikinci bir küresel buzul çağı da oksijen seviyesini arttırmış gibi görünmektedir. Böyle felaketlere yol açan küresel olaylar, fotosentezin solunuma ve karbon gömülmesinin erozyona karşı dengesini muhtemelen değiştirmiştir. Büyük buzullar erir, yağmurlar yağarken buzların kayalardan kopardığı mineral ve besinler (demir, nitratlar ve fosfatlar) okyanuslara karışmış, fotosentetik algler ve bakterilerin muazzam oranda gelişip yayılmasına neden olmuştur. Bugün gübrelerin yol açtığına benzer, ama ondan çok daha büyük bir etkidir bu. Böyle bir olay bir popülasyon patlamasına yol açmakla kalmamış, karbonu gömme eğilimi de göstermiştir; okyanuslara akan toz, kirli buz ve iri kum, nüfusları artan bakterilerle karışmış ve çökerek, görülmemiş ölçekte karbonu gömmüştür. Böylece oksijen miktarında kalıcı bir küresel artış meydana gelmiştir.

O halde gezegenimizin oksijenlenmesi bir anlamda tesadüfi

olmuştur. Hiçbir değişimin gözlenmediği, çok uzun denilebilecek dönemler de bu kanıyı güçlendirir. Yaklaşık olarak 2 milyar yıl öncesiyle 1 milyar yıl öncesi arasında (jeologların “sıkıcı milyar” dedikleri dönemde) dikkat çekecek hemen hemen hiçbir şey olmamış gibi görünüyordu. Oksijen seviyesi bu dönem boyunca değişmemiş ve düşük kalmıştı, tıpkı yüz milyonlarca yıl boyunca olduğu gibi. Jeolojik huzursuzluk dönemleri kalıcı değişim getirirken, istikrar (stasis) hüküm sürer. Bu gibi jeolojik etkenler başka gezegenlerde de devreye girmiş olabilir, ama oksijenin birikmesi için gerekli tesadüfi koşulların ortaya çıkması için tektonik hareketler ve volkanik faaliyetler gerekliymiş gibi görünmektedir. Fotosentezin uzun zaman önce Mars’ta evrilmiş olması mümkündür, ama bu küçük gezegen, küçülen volkanik çekirdeğiyle oksijenin birikmesi için gerekli jeolojik akışı sağlayamamış, ardından da fotosentez gezegensel ölçekte son bulmuş olabilir.



Fakat fotosentezin bir gezegende mutlaka oksijenli bir atmosfere yol açmak zorunda olmamasının ikinci ve daha önemli bir sebebi vardır. Fotosentez bir hammadde olarak suya hiç bağlı olmayabilir. Çevremizde gördüğümüz biçimiyle fotosenteze aşinayız. Otlar, ağaçlar, yosunlar, hepsi de esasen aynı biçimde işleyerek oksijen salar, bu “oksijenik” fotosentez olarak bilinen süreçtir. Ama birkaç adım geri gider, bakterileri düşünürsek, başka birçok seçenek vardır. Nispeten ilkel bazı bakteriler, su yerine çözülmüş demir ya da hidrojen sülfür kullanır. Bunlar bize akıl almaz hammaddeler olarak görünüyorsa, bunun tek sebebi, oksijenli dünyamıza (“oksijenik” fotosentezin ürününe) çok alışmış olmamızdır, o kadar ki dünyanın ilk zamanlarında, fotosentezin ilk evrildiği devirlerdeki koşulları tasavvur etmek için çaba sarf etmemiz gerekir.

Fotosentezin sezgilere ters düşen, ama aslında basit olan mekanizmasını kavramak için de mücadele etmemiz gerekir. Genel fotosentez algısını gösterdiğini sandığım bir örnek vereyim. Primo Levi’nin 1975’te yayınlanan ve 2006’da, Londra’da Royal

Institution'da benim de aralarında bulunduğum bir topluluk tarafından "gelmiş geçmiş en iyi popüler bilim kitabı" olarak seçilen *Periyodik Tablo* adlı kitabından:

Karbon atomumuz yaprağa girer, sayılamayacak kadar kalabalık (ama burada yararsız) azot ve oksijen molekülleriyle çarpışır. Kendisini harekete geçiren büyük ve karmaşık bir moleküle bağlanır, tam o sırada ısıldayan bir gün ışığı huzmesi biçiminde, göklerden belirleyici mesajı alır; bir örümceğin yakaladığı bir böcek gibi bir anda oksijeninden ayrılır, hidrojenle ve (sanırım) fosforla birleşir, son olarak da bir zincire dahil olur, zincirin uzun ya da kısa olması önemli değildir, hayat zinciridir bu.

Levi'nin ilham verici kitabını eleştirmek istemiyorum, ama bu pasajı tekrar tekrar okuduğumda hayrete kapıldım. Tümüyle yanlış çünkü. Levi kimya alanındaki maharetinden ziyade derin insancılığı ve cezbedici yazılarıyla hatırlansa da daha iyi bilmesi gerekirdi: Fotosentezin gerçek kimyası 1930'lardan beri biliniyor. Levi sadece kendisinin (ve sanırım birçok kişinin) neler olduğuna dair düşüncelerini uçuşan bir tarzda kaleme almış. Ama karbondioksiti harekete geçiren şey ısıldayan bir gün ışığı huzmesi değildir: Karbondioksit gece yarısı da harekete geçebilir, aslında gün ışığının en parlak olduğu zamanlarda bile ışıkla harekete geçmez. Ayrıca karbon bir anda oksijeninden ayrılmaz. Oksijen inatla karbonuna tutunur. Levi, fotosentezle salınan oksijenin karbondioksitten geldiğini varsayma yanılgısına düşüyor. Öyle değildir, oksijen sudan gelir. Dünyadaki bütün farkı da bu yaratır. Fotosentezin nasıl evrildiğini anlamanın ilk adımı budur. Gezegenimizdeki enerji ve iklim krizlerini çözmenin ilk adımı da budur.

Fotosentezde kullanılan güneş enerjisi, suyu hidrojen ve oksijene ayırır; okyanusların morötesi ısınımıyla sürülüp uzaya akmasıyla gezegen ölçeğinde gerçekleşen tepkimenin aynısıdır bu. Fotosentezin başardığı şey (bizim şimdiye kadar başaramadığımız şey) asgari düzeyde enerji girdisiyle sudan hidrojeni ayıştıracak bir katalizör bulması, yakıcı morötesi ya da kozmik

ışınlar yerine nazik güneş ışığını kullanmasıdır. Bizim insani dehamız şimdiye dek suyu moleküllerine ayırırken, kazandığımızdan daha fazla enerji tüketmeyi becermiştir. Hidrojen atomlarını sudan nazikçe ayıran basit bir katalizörle fotosentezi taklit etmeyi başardığımızda dünyanın enerji krizini çözmüş olacağız. Bu hidrojeni yakmak dünyanın bütün enerji ihtiyacını rahatça karşılayacak, tek atık olarak da suyu yeniden üretecektir: Kirlenme yok, karbon ayak izi yok, küresel ısınma yok. Ama bu hiç de kolay bir iş değildir, çünkü su, okyanusların da gösterdiği üzere muhteşem derecede istikrarlı bir atom bileşimidir; en şiddetli fırtınalar, en çetin yamaçlar suyu, onu oluşturan atomlara ayıramaz. Su gezegenimizde hem en sık bulunan hem de en ele geçmez hammaddedir. “Su, su, su, her yerde su var, ama içecek bir damla su yok,” diyordu kadim denizci. Modern denizciyse gemisini suyla ve bir gün ışığı huzmesiyle nasıl yürüteceği üzerine aynı biçimde düşünebilir. Dalgaların üstünde yüzen yeşil köpüklü tabakaya sorması gerekir bunu.

O köpüklü tabakanın uzak ataları, bugünkü siyanobakterilerin, gezegenimizde suyu ayırma numarasını bulma şansına erişmiş tek hayat biçiminin ataları da aynı problemle karşı karşıya kalmıştı tabii ki. Tuhaf olan şudur ki siyanobakteriler, bakteri akrabalarının hidrojen sülfürü ayrıştırması ya da demiri oksitlemesiyle aynı gerekçe yüzünden suyu ayrıştırır: Elektronlarını istedikleri için. Şöyle bir bakıldığında, elektronların bulunacağı en son yer sudur.

Fotosentez kavramsal olarak basittir: Tümüyle elektronlarla ilgilidir. Karbondioksit, elektirik yükünü dengelemek için birkaç protonla birlikte birkaç elektron ekleyin, o da nesi, işte karşınızda, organik bir şeker molekülü, Primo Levi’nin hayat zinciri, bütün besinimizin nihai kaynağı. Peki ama elektronlar nereden gelir? Güneşten alınan azıcık enerji sayesinde hemen hemen her yerden gelebilirler. Fotosentezin aşına olduğumuz “oksijenik” biçiminde sudan gelirler, ama aslında elektronları su kadar kararlı olmayan başka bileşiklerden almak çok daha kolaydır. Elektronları hidrojen sülfürden alırsanız, havaya oksijen salmak

yerine element halinde sülfür çökeltirsiniz, Kitab-ı Mukaddes'te geçen kükürt yani. Okyanuslarda çözülmüş demirden elektron alırsanız, paslı kırmızı demir elde edersiniz, çökeliş yeni kayalar oluşturur; bir zamanlar dünyanın her yerinde bulunan geniş "şerit demir oluşumları"nın ve bugün geride kalan düşük dereceli demir cevheri rezervlerinin en büyüklerinin oluşumunun ardında bu süreç vardır.

Bu fotosentez biçimleri bugünün oksijen zengini dünyasında marjinaldir, çünkü bu süreçlerin hammaddeleri olan hidrojen sülfür ve çözülmüş demir güneşli, iyi havalandırılmış sularda nadiren bulunur. Ama dünya gençken, serbest oksijenin doğuşundan önce, bu maddeler açık arayla en kolay elektron kaynakları olsalar gerekti, herhalde okyanuslarda doygunluğa erişmişlerdi. Bu durum bir paradoks yaratır, bu paradoksun çözümü fotosentezin en başta nasıl evrildiğini anlamak açısından temel önemdedir. Neden bol bol bulunan, rahat bir elektron kaynağından suya, çok daha sorunlu bir kaynağa geçilmiştir? Su sorunlu bir elektron kaynağıdır, çünkü atık ürünü olan oksijen kendisini üreten herhangi bir bakteriye çok ağır hasar verebilen zehirli bir gazdır. Güneş enerjisi ve akıllı bir katalizör sağlandığında, suyun diğer iki kaynaktan da bol olması gerçeği konu dışıdır, çünkü evrimin bir öngörüsü yoktur. Oksijenik fotosentezin dünyayı dönüştürmüş olması da konu dışıdır, dünyanın umurunda bile değildir. Peki o zaman böyle bir değişimin ardında ne tür bir çevresel baskı ya da mutasyonlar olabilir?

Buna verilebilecek, birçok ders kitabında kolayca bulabileceğiniz kolay cevap, hammaddelerin tükendiğidir. Hayat yüzünü suya döndü, çünkü geriye kolay bir alternatif kalmamıştı, tıpkı fosil yakıtlar tükenince bizim de yüzümüzü suya dönebileceğimiz gibi. Ama bu cevap doğru olamaz, jeolojik kayıtlar "oksijenik" fotosentezin bütün bu hammaddelerin tükenmesinden çok önce (bir milyar yılı aşkın bir süre önce) evrildiğini açıkça ortaya koymaktadır. Hayat köşeye sıkışmamıştır.

Bugün ortaya çıkmakta olan bir başka cevapsa fotosentez mekanizmasının kendisinde gizlidir, tepeden tırnağa daha güzel bir

cevaptır. Şans ve zorunluluğu birleştiren, dünyadaki en sarmal, en karmaşık çıktılardan birini yalınlığın ışığıyla aydınlatan bir cevaptır bu.



Bitkilerde elektron ayrıştırma işi kloroplastlarda gerçekleşir. Kloroplastlar bütün yapraklarda, her bir otta bulunan, kendi yeşillerini yapraklara veren minicik yeşil yapılardır. Onlara renklerini veren pigmentin, fotosentez sürecinde güneş enerjisini soğurmaktan sorumlu olan klorofilin adını taşırlar. Klorofil, kloroplastların içini oluşturan olağandışı bir zar sistemine gömülmüştür. Bilimkurgu filmlerinde dünyayı inceleyen şu uzay istasyonlarına benzer büyük düz disk yığınları, baş döndürücü mekanları bütün açılardan, bütün yüksekliklerden kesen tüplerle birbirlerine bağlanmıştır. Bu disklerde fotosentezin en büyük işi gerçekleşir: elektronların sudan ayrıştırılması.

Elektronların sudan ayrıştırılması zorsa da, bitkiler buradan olağanüstü bir ziyafet çıkarırlar. Protein ve pigment kompleksleri moleküler düzeyde o kadar engindirler ki küçük bir şehir bedeldirler. Hep birlikte Fotosistem I ve Fotosistem II olarak bilinen iki büyük kompleks oluştururlar, her kloroplast böyle binlerce fotosistem içerir. İşleri, gün ışığını yakalamak ve canlı maddeye çevirmektir. Bunu nasıl yaptıklarını anlamak bir asra yakın zaman almış, o zamana kadar gerçekleştirilmiş en zarif ve dahiyane deneylerin kurulmasını gerektirmiştir. Fakat maalesef bunları tartışmanın yeri burası değil.³ Burada sadece bu süreçte öğrendiklerimizle, bütün bunların fotosentezin icadı hakkında neler söyleyebileceğiyle ilgilenmemiz gerekiyor.

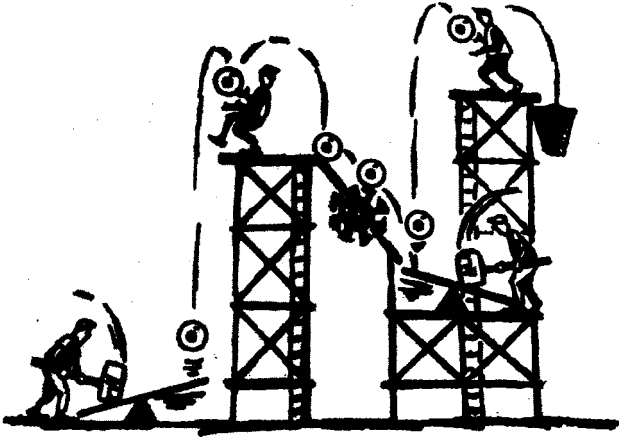
Fotosentezin kavramsal kalbi, her şeyi anlamlandıran yol haritası "Z şeması" olarak bilinir; biyokimya öğrencilerini aynı ölçüde büyüleyen ve korkutan bir formüldür bu. İlk olarak 1960'ta parlak ve utangaç bir İngiliz'in, Robin Hill'in gözler önüne serdiği Z şeması, fotosentezin "enerji profili"ni betimler. Hill korkunç derecede ketumdu. Aşık olana dile getirip kimseyi rencide etmek istemediğinden, onun ne hakkında çalıştığını pek bilmeyen

laboratuvar arkadaşları bile, varsayımı 1960'ta *Nature*'da yayınlandığında şaşırmışlardı. Aslında Z şeması Hill'in kendi çalışmasına (asıl önemli çalışma oydu) dayanmıyordu, soru işareti yaratan çok sayıda deneysel gözlemden süzölmüştü. Bu gözlemler arasında en öne çıkarsa termodinamik ile ilgili ilginç bir meseleydi. Öyle anlaşıyordu ki fotosentez sadece yeni organik maddeler değil, hayatın "enerji birimi" olan ATP'yi de üretiyordu. Pek beklenmedik bir biçimde görüldüğü kadarıyla, bu ikisi her zaman ele ele gidiyordu, fotosentez yoluyla ne kadar fazla organik madde üretilirse o kadar fazla ATP üretiliyordu, tersi için de aynısı geçerliydi. (Organik madde miktarı düşerse ATP üretimi de geriliyordu.) Besbelli ki güneş aynı anda iki bedava yemek sunuyordu. Dikkat çekicidir ki Robin Hill, bir tek bu gerçekten hareketle fotosentez mekanizmasının tamamını kavrayabilmişti. Dehanın, herkesin gözünün önünde olanı görme becerisinde yattığı söylenir.⁴

Ne var ki (genelde Hill'le ilgili her şeyde olduğu gibi) "Z şeması" teriminin bile özlü bir yanıltıcılığı vardı. Z'nin aslında 90 derece çevrilip N yapılması gerekir, böylece fotosentezin enerji profilini daha doğru yansıtır. "N"deki ilk yükselmeyi dikey bir tırmanma tepkimesi olarak düşünün, bu tepkimenin gerçekleşmesi için enerji sağlanmalıdır. "N"deki köşegenden aşağıya inişse aşağı doğru bir tepkimedir, ATP biçiminde yakalanıp depolanabilecek enerji salar. Son yukarı çıkış ise yükselen bir tepkimedir, bir enerji girdisi gerektirir.

Fotosentezde, "N"nin alttaki iki noktasında iki fotosistem yatar: Fotosistem I ve Fotosistem II. Bir ışık fotonu ilk fotosisteme vurur ve bir elektronu ayırıp daha yüksek bir enerji düzeyine çıkarır; daha sonra bu elektronun enerjisi, ATP yapmak için gerekli enerjiyi sağlayan bir dizi küçük moleküler adımda şelale gibi dökülür. Yine enerjisi düşük bir seviyeye gerileyen elektron ikinci fotosisteme ulaşır, burada ikinci bir foton ikinci bir kez elektronu yüksek enerji seviyesine çıkarır. Bu ikinci yüksek noktadan, elektron nihayetinde karbondioksit transfer olur, bir şeker elde etmenin ilk adımı budur. Richard Walker'ın çizdiği bir

karikatürde (Şekil 3.1) bu süreç panayırarlarda rastlanan bir güç sinama oyunu gibi resmedilmiştir, oyunda bahse giren kişi bir tokmakla platforma vurarak metal bir topun yukarı çıkıp çana vurmasını sağlamaya çalışır. Bu örnekte, çekicinin vurulması topun yukarı çıkması için gerekli enerjiyi sağlar; fotosentezde ise aynı işi güneşten gelen bir fotonun enerjisi yapar.



Şekil 3.1 Richard Walker'ın Z şemasını resmeden bir grafik. Bir fotonun tokmak darbesi olarak resmedilen enerjisi, bir elektronun yüksek bir enerji seviyesine çıkarır. Elektron daha düşük bir enerji seviyesine inerken, salınan enerjinin bir bölümü hücrede ışık üretmesini sağlar. Sonra ikinci bir foton elektronu daha da yüksek bir enerji seviyesine çıkarır, elektron burada bir yüksek enerji molekülü biçiminde (NAPDH) tutulur, bu molekül daha sonra karbondioksitle tepkimeye girerek organik bir molekül oluşturur.

İster Z şeması ister N şeması deyin, bu şema işlerin ilginç bir biçimde, kıvrılarak yol aldığını gösterir, ama bunun teknik bakımdan haklı gerekçeleri vardır. Z şeması elektronların sudan ayrıştırılması ile karbondioksitin başka bir biçimde şekere çevrilmesini bir araya getirerek kimyasal olarak imkansızın sınırına yaklaşır. Bunun sebebi elektron transferinin niteliğinde ve özellikle de elektronların belli bileşiklere kimyasal ilgisinde yatar. Görmüş olduğumuz gibi su çok karardır, elektronları birbirine çok bağlıdır. Sudan bir elektron çekmek çok büyük bir çekim

gücü, yani çok güçlü bir oksidant (yükseltgen) gerektirir. Bu güçlü oksidant, klorofilin açgözlü bir biçimidir; yüksek enerjili fotonlar emerek, uysal Dr. Jekyll olmaktan çıkıp moleküler bir Mr. Hyde'a dönüşmüştür.⁵ Ama çekmekte iyi olan bir varlık, itmekte o kadar iyi olmama eğilimindedir. Elektronları sıkı sıkı kavrayan bir molekül, kimyasal olarak onları itmeye gönülsüzdür, tıpkı insanlardan hoşlanmayan Mr. Hyde'ın ya da elindeki lere sarılan bir cimrinin kendiliğinden cömertçe eylemlerle servetini vermeye yanaşmaması gibi. Aynı şey, bu klorofil biçiminde de geçerlidir. Işıkla harekete geçirildiğinde, sudan elektronları çekme konusunda muazzam bir gücü vardır, ama onları başka yerlere itme konusunda pek güçlü değildir. Kimya jargonuyla söyleyecek olursak, güçlü bir yükseltgen (oksidant) ama zayıf bir indirgendir.

Karbondioksit tam tersi bir sorun doğurur. O da çok karardır, daha fazla elektronla dolmak gibi kimyasal bir arzusu yoktur. Ancak ve ancak çok daha güçlü bir iticiden, kimya jargonunda söylersek, güçlü bir indirgenden istemeye istemeye elektron kabul edecektir. Bu da başka bir klorofil, biçimi gerektirir, itmekte çok iyi, çekmekte zayıf bir klorofil. Bu klorofil varına yoğunla sarılan bir pinti olmak şöyle dursun, yoldan gelip geçenlere şaibeli mallar kaktırmaya niyetli sokak satıcılarına benzer. Işıkla etkin hale geldiğinde, bu klorofil elektronlarını, aslında onlardan aynı ölçüde uzak durmaya çalışan başka bir moleküle, suç ve işporta işindeki ortağı NADPH'ye ve nihayetinde karbondioksite zorla dayatma gücüne sahip olur.⁶

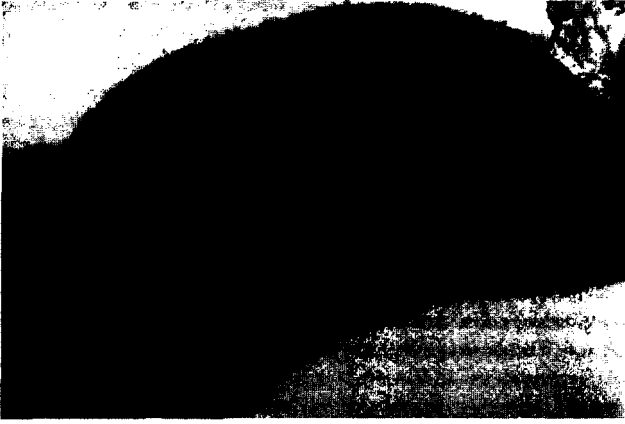
Öyleyse fotosentezde iki fotosistem olmasının bir nedeni vardır. Bunda şaşırarak hiçbir şey yoktur. Ama asıl zor soru şudur: Böyle karmaşık iç ilişkileri olan bir sistem nasıl evrilmiştir? Aslında bu olaylar dizisi beş kısımdan oluşmaktadır. İlki "oksijen evriltme kompleksi"dir: Su moleküllerini yönlendirip elektronlarını tek tek alan, atık olarak da oksijen salan bir tür molekül kırıcıdır bu. Sonra Fotosentez II gelir (biraz kafa karıştırıcı bir biçimde, tarihsel nedenlerle bu iki fotosistem ters bir sıralamayla isimlendirilmiştir). Işıkla etkinleştiğinde, bu fotosistem

bizim moleküler Mr Hyde'a dönüşür ve oksijen evriltme kompleksinden gelen elektronları yutar. Onu, topu elden ele geçiren Amerikan futbolu oyuncularını gibi elektronları taşıyan elektron nakil zinciri izler. Elektron nakil zinciri, aşağı inen enerji merdivenini kullanarak biraz ATP üretir, sonra da aynı elektronları Fotosistem I'e teslim eder. Burada başka bir foton, elektronları yeniden yüksek enerji seviyesine çıkarır, elektronlar onlardan kurtulmaktan başka bir şey istemeyen güçlü bir elektron itici olan moleküler "işportacı" NADPH'ye emanet edilir. Son olarak da karbondioksiti etkinleştirmek ve şekere dönüştürmek için gerekli olan moleküler mekanizma gelir. Fotosistem I'in ürettiği moleküler "işportacı," karbondioksitin şekere dönüştürülmesi sürecinde kullanılır ve bu süreç gücünü ışıktan değil kimyadan alır. Aslında karanlık tepkime olarak bilinir, fotosentezin Primo Levi'nin gözünden kesinlikle kaçmış bir yönüdür.

Bu beş sistem sırayla işleyerek sudan elektronları ayırıştırır, onları karbondioksite iterler. Bir cevizi kırmanın muazzam derecede karmaşık bir yoludur, ama öyle görünüyor ki bu cevizi kırmanın tek yolu budur. Evrimle ilgili büyük soru şudur: Birbirleriyle ilişkili bütün bu karmaşık sistemler nasıl varlık bulmuştur ve nasıl oksijenik fotosentezin işlemlerini sağlayacak doğru biçimde (herhalde tek biçimde) düzenlenmişlerdir?



"Olgu" sözcüğü her zaman biyologları titretmesi muhtemel bir sözcüktür, çünkü her kuralın birçok istisnası vardır; ama oksijenik fotosentezle ilgili, neredeyse kesin böyle bir "olgu" vardır: Oksijenik fotosentez bir kez evrilmiştir. Fotosentezin gerçekleştiği yer, kloroplast, bütün bitkiler ve alglerin bütün fotosentetik hücrelerinde bulunur, kloroplastlar her yerdedir ve birbirleriyle ilişkili oldukları da bellidir. Gizli bir tarihi paylaşırlar. Geçmişlerinin ipucu, büyüklüklerinde ve şekillerinde yatar; daha büyük bir ev sahibi hücrenin içinde yaşayan küçük bakterilere benzerler (Şekil 3.2). Bu bakteriyel atalara dair ipucunu, bütün kloroplastlarda bağımsız DNA halkalarının varlığı da doğrular. Bu DNA



Şekil 3.2 Bir pancar (*Beta vulgaris*) kloroplastının klasik görünümü, fotosentez sırasında suyun ayrışarak oksijen saldığı membran demetleri görülüyor. Bakteriyle benzerlik tesadüfi değildir, kloroplastlar bir zamanlar serbest siyanobakterilerdi.

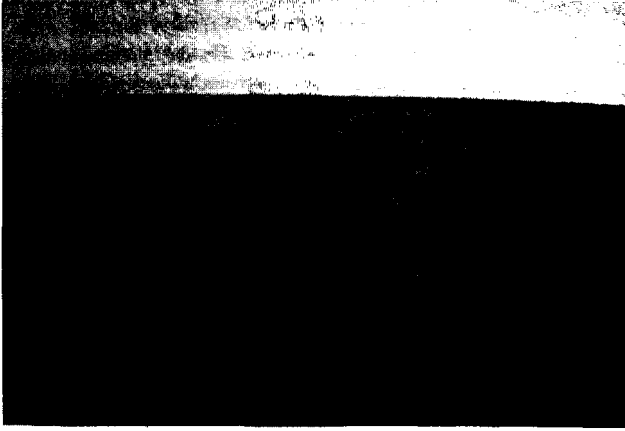
halkaları kloroplastlar bölündüğünde kopyalanır ve bakterilerde olduğu biçimde yavrulara aktarılır. Kloroplast DNA'sındaki harflerin ayrıntılı dizilimi bunların bakterilerle olan bağlantısını doğrulamakla kalmaz, yaşayan en yakın akrabalarını da işaret eder: siyanobakterileri. Son, ama bir o kadar önemli bir nokta da bitki fotosentezinin Z şemasının, bileşeni olan beş kısımla birlikte siyanobakterilerde önceden (daha basit bir mekanizmayla) eksiksiz bir biçimde gelişmiş olmasıdır. Kısacası, kloroplastların bir zamanlar serbest yaşayan siyanobakteriler olduğuna hiç kuşku yoktur.

Bir zamanlar şiişsel bir biçimde “mavi-yeşil algler” diye yanlış isimlendirilen siyanobakteriler, “oksijenik” fotosentezle suyu ayrıştırabilen bilinen tek bakteri grubudur. Bazılarının nasıl olup da daha büyük bir ev sahibi hücrede yaşamaya başladığı derin jeolojik zamanın kefenine sarılmış bir gizemdir; hiç kuşku yok ki 1 milyar yılı aşkın bir süre önce gerçekleşmiştir bu, ama muhtemelen bir gün yutulmuşlar, sindirimden sağ kurtulmuşlar (olağandışı değildir) ve nihayetinde ev sahibi hücreye yararlı olmuşlardır. Siyanobakterilerle dolu ev sahibi iki büyük imparatorluk kurmuştur: algler ve bitkiler. Bugün bunların hepsi de bakteriyel

misafirlerinden miras aldıkları fotosentetik aygıt sayesinde, su ve güneşle yaşama becerileriyle tanımlanır.

Böylece fotosentezin kökenini ortaya çıkarma arayışı, siyanobakterilerin, suyu ayrıştırma sorununu çözmüş tek bakteri tipinin kökenini ortaya çıkarma arayışına dönüşmüştür. Bu da modern biyolojinin en tartışmalı, hatta hâlâ çözüme kavuşmamış hikayelerinden biridir.

Yeni binyılın başlangıcına kadar, çoğu araştırmacı, kafaları karışmış olsa da California Üniversitesi Los Angeles'ta görevli enerjik ve mücadeleci paleobiyoloji profesörü Bill Schopf'un dikkat çekici bulgularına ikna olmuştu. Schopf 1980'lerden itibaren dünya üzerindeki hayatın en eski (3 milyar 500 milyon yıl yaşındaki) fosillerinin bazılarını keşfedip analiz etmişti. Burada "fosil" sözcüğüne biraz açıklık getirmemiz gerekiyor. Schopf'un bulduğu şeyler bakteriye çok benzeyen, onlarla aynı büyüklükte olan mikroskobik kaya kapsülü dizileriydi. Schopf bunların ayrıntılı yapılarından yola çıkarak en başta, bu fosillerin siyanobakteri olduğunu ileri sürmüştü. Bu minicik mikrofossiller genellikle fosil stromatolitlere benzeyen şeylerle ilişkilendiriliyordu. Yaşayan stromatolitler, katman katman yaklaşık bir metrelik yüksekliğe erişen, gömülmüş mineral katmanları çevreleyen bakteri topluluklarının oluşturduğu mineralleşen kubbelerdir. Nihayetinde yapının tamamı sert bir kayaya dönüşür, genellikle kesitleri çarpıcı güzelliكتedir (Şekil 3.3). Bugünkü stromatolitlerin canlı dış katmanları genellikle siyanobakteri kaynar, dolayısıyla Schopf bu antik biçimlerin, siyanobakterilerin ilk ortaya çıkışlarının kanıtları olabileceği iddiasında bulunabilmişti. Kuşkuya mahal kalmasın diye de bu varsayılan fosillerin, hayatın, ama herhangi eski bir hayatın değil, fotosentetik hayatın işareti gibi görünen türden organik karbon kalıntıları içerdiğini göstermeye girişmişti. Schopf siyanobakterilerin ya da onlara çok benzeyen bir şeyin, dünyada 3 milyar 500 milyon yıl önce, gezegenimizin ilk yıllarına damgasını vuran büyük asteroid bombardımanının son bulmasından sadece birkaç yüz milyon yıl sonra, yani güneş sisteminin oluşumundan kısa süre sonra evrildiğini söylüyordu.



Şekil 3.3 Batı Avustralya'da Shark Körfezi yakınlarında Hamelin Göleti'nde yaşayan stromatolitler. Gölet suyu açık okyanus suyuna nazaran iki kat daha tuzludur, bu da salyangoz gibi tüketicilerin nüfusunu azaltırken siyanobakteri kolonilerinin çoğalmasını mümkün kılar.

Pek az kişi Schopf'un bu antik fosillerle ilgili yorumuna karşı çıkacak donanıma sahipti, onlar da ikna olmuş görünüyordular. Ama o kadar uzman olmasalar da bazıları daha şüpheli bir yaklaşımı benimsemişti. Siyanobakterilerin ilk çağlardaki evrimini (bugün yaptıkları gibi muhtemelen atık ürün olarak oksijen çıkarmalarını) atmosferdeki oksijene ait, bir milyar yıl daha sonrasında kalma ilk jeolojik işaretlerle uyuşturmak kolay değildi. Herhalde daha da ciddi, Z şemasının karmaşıklığı, çoğu biyoloğun oksijenik fotosentezin bu kadar hızlı evrilmiş olabileceği fikrine ayak diremesine neden olmuştu. Fotosentezin başka biçimleri, daha basit olduklarından, daha eski olmaya daha uygun görünüyordu. Çoğu kişi bu fosillerin bakteri, muhtemelen fotosentetik bakteriler olduğunu kabul ediyordu, ama gerçekten siyanobakteri, gelişimin zirvesi olup olmadıkları konusunda şüpheler vardı.

Sonra Oxford'da çalışan paleobiyoloji profesörü Martin Brasier, neresinden bakılırsa bakılsın kahramanlarının tutkusu ve sunduğu kanıtların büyük bölümünün esnekliğiyle dikkat çeken bir bilim dalı olan modern paleontolojinin en büyük kavgaların-

dan biri haline gelecek bir tartışmayla ringe çıktı. İlk fosillere ilgi duyan çoğu araştırmacı Londra'da Doğa Tarihi Müzesi'nde bulunan numunelere güvenir, ama Brasier, Schopf'un fosilleri kazıp çıkardığı yerin jeolojik ortamına geri döndü ve şaşkınlığa uğradığını ifade etti. Brasier, o bölgenin tamamının Schopf'un ileri sürdüğü gibi sıg, sakın bir deniz tabanı olmak şöyle dursun, çalkantılı bir jeolojik geçmişin kanıtı olan jeotermal damarlarla dolu olduğunu söylüyordu. Schopf, argümanını ileri sürebilmek için örneklerini cımbızla seçmişti, yüzeysel olarak onlara benzeyen, ama açıkça biyolojik olmayan başka numuneleri gizlemişti; muhtemelen bunların hepsi kaynar suyun mineral çökeltiler üzerindeki hareketiyle oluşmuştu. Brasier, stromatolitlerin de bakterilerle değil, jeolojik süreçlerle oluştuğunu, kumdaki dalgalanmalardan daha gizemli olmadıklarını söylüyordu. Organik karbon da hiç mikroskobik bir yapı göstermiyordu, bu yüzden de birçok jeotermal ortamda bulunan inorganik grafitten ayırt edilmesi pek mümkün değildi. Son olarak, bir zamanların büyük bir bilim insanının cesedine kazık çakarcasına, Schopf'un eski bir yüksek lisans öğrencisi zorbalığa maruz kaldığını, şaibeli yorumlar yapmaya zorlandığını aktardı. Öyle görünüyordu ki Schopf artık bir enkazdı.

Ama yenilgiyi çabucak kabullenmeyen Schopf ayağa kalkıp dövüştü. Argümanını desteklemek için daha fazla veri topladı ve Nisan 2002'de NASA'nın hararetli bir bahar toplantısında Brasier'ı ringde karşıladı, ikili pozisyonlarını savunmaya geçti. Tepeden tırnağa mağrur bir Oxford beyefendisi olan Brasier, Schopf'un argümanını "sadece ısı veren, pek ışığın olmadığı tam bir hidrotermal performans olduğu" sözleriyle kınıyordu. Böyle bile olsa, jüri her iki tarafın argümanlarına da yeterince ikna olmamıştı. İlk mikrofosillerin biyolojik kökenleri sahiden kuşkuyla karşılanmıştı karşılanmasına, gelgelelim sadece yüz milyon yıl sonrasına ait başka bazı fosiller o kadar tartışmalı değildi, Brasier bizatihi bu çağa ait aday fosiller ileri sürmüştü. Schopf da dahil çoğu bilim insanı, biyolojik kökenleri belirlemek için artık daha sıkı kriterler uyguluyor. Bu kavgadaki şimdiye kadar verilmiş

tek zaiyat bir zamanlar Schopf'un şöhretini süsleyen siyanobakterilerdir. Schopf bile mikrofosillerin muhtemelen siyanobakteri olmadığını ya da en azından siyanobakteri olmaları ihtimalinin başka tip bir ipliksi bakteri olma ihtimalinden fazla olmadığını kabul etti. Böylece düzeltmelerle başlangıçtaki yapı taşlarına geri döndük, siyanobakterilerin evrimine dair en başta sahip olduğumuzdan daha iyi bir fikrimiz yok.



Bu hikayeyi, sırf fosil kayıtlarını kullanarak jeolojik zamanın derinliklerine inmenin ne kadar zor olduğunu göstermek için anlattım. Siyanobakterilerin ya da en azından atalarının varlığını kanıtlamak bile, suyu ayrıştırmanın yolunu zaten bulmuş olduklarını kanıtlamaz. Herhalde siyanobakterilerin ataları, fotosentezin daha ilkel bir biçimine dayanıyordu. Ama derin zamandan bilgi kazıp çıkarmanın, daha bilgilendirici olabilecek başka yolları vardır. Bunlar canlı şeylerin içine, hem genlerine hem fiziksel yapılarına, özellikle de protein yapılarına gömülmüş sırlardır.

Geçen yirmi-otuz yıl içinde, hem bitkisel hem bakteriyel fotosistemlerin ayrıntılı moleküler yapıları yoğun bir incelemeye alındı, bilim insanları X-ışını kristalografisinden tutun elektron spin rezonans spektroskopisine kadar, isimleri kadar kendileri de göz korkutucu metodolojilere dayalı çok sayıda teknik uygulamaya başladılar. Burada bu tekniklerin nasıl işlediğiyle ilgilenmiyoruz, bunların fotosentetik komplekslerin şekil ve yapı haritalarının ne yazık ki epeyce diyemeyeceğimiz bir yaklaşıklıkla atomik çözünürlükte çıkarılmasında kullanıldıklarını bilmemiz yeterlidir. Şimdi bile toplantılarda tartışmalar patlak verir, ama bunlar ayrıntılarla ilgili tartışmalardır. Bu satırları yazdığım sırada, Londra'da Kraliyet Cemiyeti'ndeki bir tartışma toplantısından kısa süre önce dönmüş bulunuyorum; oksijen evriltme kompleksindeki kritik önemdeki beş atomun kesin yeriyle ilgili zengin bir tartışmaydı. Argümanların hepsi de hem önemsiz hem derindi. Derindi, çünkü atomların kesin yerleri, suyun ayrıştırılmasının kesin kimyasal mekanizmasını tanımlar; bunu bilmek

dünyanın enerji krizini çözmenin kilit adımıdır. Ama önemsizdir, çünkü bu beş atomun bir atomun çapının birkaç katı kadar, yani birkaç Angstromluk bir yerde (bir milimetrenin milyonda birinden küçük) nasıl konumlanacağıyla ilgili tartışmalardır. Eski kuşak araştırmacıları hayrete düşürecek bir şey de, Jim Barber'ın Imperial College'daki ekibinin 2004'te haritasını çıkardığı Fotosistem II'deki diğer 46.630 atomun konumlarıyla ilgili pek bir anlaşmazlık olmamasıdır. Hatta daha yakın dönemde, ekip daha ayrıntılı bir harita daha çıkartmıştır.

Bu birkaç atomun ebedi istirahatgahları henüz tespit edilmiş olsa da, fotosistemlerin on yılı aşkın bir süredir haklarında ipuçları toplanan genel mimarileri artık açıklık kazanmıştır ve evrimsel tarihleri hakkında ciltler dolusu bilgi verir. Bugün St. Louis'de Washington Üniversitesi'nde seçkin bir profesör olan Bob Blankenship başkanlığındaki küçük bir ekip 2006'da bu iki fotosistemin bakterilerde' olağanüstü derecede iyi korunduğunu göstermiştir. Çeşitli bakteri grupları arasındaki muazzam evrimsel mesafeye rağmen, fotosistemlerin çekirdek yapıları, bir bilgisayar yardımıyla mekanda üst üste bindirilebilecek noktaya kadar neredeyse benzerdir. Sadece bu da değil: Blankenship, araştırmacıların uzun zamandır kuşku duyduğu bir bağlantıyı doğrulamıştır: İki fotosistemin (Fotosistem I ve II) çekirdek yapıları da ortaktır, neredeyse kesinlikle çok çok uzun zaman önce ortak bir atadan evrilmiştir.

Başka bir deyişle, bir zamanlar tek bir fotosistem vardı. Bir noktada gen kopyalanarak birbirinin aynı iki fotosistem ortaya çıkardı. Bunlar yakın bir yapısal benzerliği korurken, doğal seçilimin etkisiyle yavaş yavaş birbirlerinden farklılaştılar. Nihayetinde, iki fotosistem siyanobakterinin Z şemasında bir araya geldiler, sonra da kloroplastlarla bitkilere ve algelere geçtiler. Ama bu basit anlatı, büyüleyici bir ikilemi gözlerden gizler. İlkel bir fotosistemin kopyalanması, oksijenik fotosentez problemini asla çözemez, güçlü bir elektron iticisi ile güçlü bir elektron çekicisini bir araya getiremez. Fotosentezin işleyebilmesinden önce, iki fotosistemin ters yönlerde farklılaşması gerekmiştir, ancak

bundan sonra aralarında yararlı bir bağlantı kurulabilmiştir. O yüzden de asıl soru şudur: Hangi olaylar dizisi bu fotosentez sistemlerini ayırmış ve sonra da bir yumurtadan çıkıp farklılaştıktan sonra yeniden birleşen, kadın ve erkek misali, yakın ama zıt eşler gibi yeniden bir araya getirmiştir?

Bu soruyu cevaplamamanın en iyi yolu, fotosistemlerin kendilerine bakmaktır. Bu fotosistemler siyanobakterinin Z şemasında birleşmiştir, ama bunun ötesinde evrimsel tarihleri ilginç sapmalar gösterir. Fotosistemlerin aslında nereden geldiklerini bir anlamına bir kenara bırakalım ve bakteri dünyasında bugünkü dağılımlarına çabucak bir göz atalım. Siyanobakteriler dışında, aynı bakteride hiçbir zaman iki fotosistem bir arada bulunmaz. Bazı bakteri gruplarında yalnızca Fotosistem I, bazılarındaysa sadece Fotosistem II vardır. Her fotosistem farklı amaçlara ulaşmak için kendi başına çalışır, incelikli görevleri de oksijenik fotosentezin ilk nasıl evrildiğine ilişkin çarpıcı bir kavrayış sunar.

Fotosistem I bitkilerde ne yapıyorsa bakterilerde de onu yapar. İnorganik bir kaynaktan elektron çeker ve bir molekül “işportacı” oluşturarak bunları karbondioksit ile şeker oluşturur. Aradaki farklılık inorganik elektron kaynağıdır. Fotosistem I elektronları, başa çıkamayacağı su yerine hidrojen sülfür ya da demirden alır, bunların ikisi de suya nazaran kolay hedeflerdir. Bu arada, Fotosistem I’in oluşturduğu molekül “işportacı” NADPH, saf kimyayla, örneğin birinci bölümde tartıştığımız hidrotermal menfezlerde oluşabilir. Burada da NADPH, benzer bir dizi tepkimeyle karbondioksiti şekere çevirmekte kullanılır. Bu yüzden, Fotosistem I’in tek gerçek yeniliği, önceden sadece kimyanın yaptığı bir işi halledebilmek için ışığı kullanmaktır.

Işığı kimyaya çevirme yetisinde hiç özel bir şey olmadığını da belirtelim, herhangi bir pigmentin yapabileceği bir iştir. Pigmentlerdeki kimyasal bağlar, ışık fotonlarını emme konusunda iyidir. Böyle yaptıklarında bir elektron yüksek bir enerji düzeyine gönderilir ve yakınlardaki moleküller bu elektronu kolayca yakalayabilir. Sonuçta pigment foto-oksitlenir: Hesapları dengeleyebilmek için bir elektrona ihtiyacı vardır, o elektronu da

demirden ya da hidrojen sülfürden alır. Klorofilin bütün yaptığı budur. Klorofil bir porfirindir, yapısı itibarıyla kanımızdaki oksijeni taşıyan pigmentten, yani “hem”den farklı değildir. Başka birçok porfirin, ışıkla benzer numaralar yapabilir, kimi zaman, porfiri gibi hastalıklarda olduğu gibi nahoş sonuçlara yol açabilir.⁸ Kritik önemde bir nokta da porfirinlerin asteroitlerden yalıtılmış ve laboratuvarında akla yatkın prebiyotik koşullarda sentezlenmiş karmaşık moleküller arasında yer almasıdır. Başka bir deyişle porfirinler dünyanın ilk zamanlarında çok büyük ihtimalle kendiliğinden oluşmuştur.

Kısacası, Fotosistem I basit bir pigmenti, bir porfirini alır, onun kendiliğinden ışığın güdümündeki kimyasını her halükarda bakteriyel hücrelerde gerçekleşen tepkimelerle eşleştirir. Sonuçta demir ve hidrojen sülfür gibi “kolay” kaynaklardan elektron almak için ışığı kullanabilen ve elektronları karbondioksit'e geçirip şeker oluşturan ilkel bir fotosentez biçimi ortaya çıkar. Böylece bu bakteriler besin yapmak için ışığı kullanırlar.

Peki ya Fotosistem II? Bu fotosistemi kullanan bakteriler, çok farklı bir numara yapmak için ışıktan yararlanırlar. Bu fotosentez biçimi organik madde üretmez, ışık enerjisini hücreye enerji vermekte kullanılabilecek kimyasal enerjiye çevirir. Bu mekanizma çok basittir. Bir foton bir klorofil molekülüne çarptığında bir elektron, daha önceki sistemde olduğu gibi, daha yüksek bir enerji seviyesine çıkarılır, burada yakınındaki bir molekül tarafından yakalanır. Daha sonra bu elektron bir elektron nakil zinciri boyunca elden ele geçirilir, her adımda biraz enerji bırakır, sonunda düşük enerji seviyesine iner. Bu süreçte salınan enerjinin bir bölümü ATP yapmak üzere yakalanır. Sonunda enerjisi tükenmiş elektron her şeyi başlatan klorofile iade edilir ve çember tamamlanır. Kısacası ışık bir elektronu yüksek enerji seviyesine çıkarır, elektronun enerjisi “dinlenme” seviyesine doğru gerilerken, salınan enerji ATP, hücrenin kullanabileceği bir enerji biçimi olarak yakalanır. Enerjisini ışıktan alan bir devredir bu.

Peki böyle bir devre nasıl oluşmuştur? Bu sorunun da cevabı “Karıştırarak ve eşleştirerek”tir. Elektron nakil zinciri esasen

hücrelerin solunum sırasında kullandığı zincirin aynısıdır, sadece birazcık değişik bir amaç için ödünç alınmıştır. Solunum sırasında, daha önce belirttiğimiz üzere, elektronlar besinden çekilir ve nihayetinde oksijene geçirilerek su oluşturulur. Salınan enerji ATP üretiminde kullanılır. Bu fotosentez biçiminde kesinlikle aynı şey gerçekleşir: Yüksek enerjili elektronlar bir zincir boyunca oksijene değil de, “varına yoğuna sarılan” (oksitleyici) bir klorofil biçimine geçirilir. Klorofil elektronları ne kadar “çekerse” (kimyasal niteliği bakımından oksijene ne kadar yakınsa) zincir o kadar verimli olacak, elektronları çekecek, enerjilerini alacaktır. Asıl büyük avantaj hiçbir yakıtı, yani hiç besine ihtiyaç olmamasıdır, en azından enerji sağlamak için. (Yeni organik moleküller sentezlemek için enerjiye ihtiyaç vardır.)

O halde, genel bir sonuç olarak, daha basit fotosentez biçimlerinin nitelikleri itibarıyla mozaığe benzediğini söyleyebiliriz. Her iki fotosentez biçimi de mevcut moleküler mekanizmaya yeni bir güç çevirici, yani klorofil ekler. Birinde bu mekanizma karbondioksiti şekere çevirir, diğerindeyse ATP üretir. Solunumun ve karbon sabitlenmesinin evrimini birinci bölümde değerlendirmiştik, burada onlarla ilgilenmiyoruz. Klorofile gelince; benzer porfirin pigmentleri muhtemelen dünyanın ilk zamanlarında kendiliğinden oluşmuş, gerisini de doğal seçim halletmiştir. Her iki sistemde de klorofilin yapısındaki küçük değişiklikler emilen ışığın dalga boyunu, dolayısıyla klorofilin kimyasal özelliklerini değiştirir. Bütün bu değişiklikler kendiliğinden gerçekleşen süreçlerin verimliliğini değiştirir, gerçi başta çok daha fazla israfa yol açmış olmalıdırlar. Doğal sonuç, bazı başıboş bakterilerde, ATP sentezi için “varına yoğuna sarılan cimri” bir klorofil biçiminin; hidrojen sülfür ya da demir kaynaklarına yakın yaşayan bakterilerdeyse şeker yapımı için “işportacı” tipinde bir klorofilin ortaya çıkması olmuştur. Ama daha büyük soru yine yanıtlanmadan kalmıştır: Bütün bunlar siyanobakterinin Z şemasında, nihai yakıtın, suyun ayrıştırılması için nasıl birbirine bağlanmıştır?



Bu soruya verilebilecek kısa cevap, bu konuda kesin bir bilgimiz olmadığıdır. Kesin bir cevap bulmanın yolları vardır, ama maalesef bunlar işe yaramamıştır. Örneğin, bakterilerdeki fotosistemlerin genlerini sistematik olarak karşılaştırıp, fotosistemlerin atalarını açığa çıkaran bir gen ağacı oluşturabiliriz. Ama bu gibi ağaçlar, bakteri hayatının bir gerçeği olan seks yüzünden devrilip gitmişlerdir. Bakterilerin seks hayatı bizimkine benzemez; bizimki gibi genlerin kuşaklar boyunca kalıtımla aktarıldığı, gayet düzenli bir soyağacı ortaya çıkarmaz. Bakteriler, genetikçilerin çabalarını dikkate almayan çapkınca bir kayıtsızlık içinde genlerini ortaya saçar. Sonuçta ortaya bir ağaçtan çok, bazı bakterilerin genlerinin tümüyle ilgisiz bir başka bakteriye geçtiği bir ağ çıkar. Bu da fotosistemlerin Z şemasında nasıl bir araya geldiğine dair elimizde gerçek bir genetik kanıt bulunmadığı anlamına gelir.

Ama bu, cevabı bulmaya kafa yoramayacağımız anlamına gelmez. Bilimde hipotezlerin asıl büyük değeri, bilinmeyene doğru hayal gücüyle sıçrayarak postülaları destekleyebilecek ya da çürütebilecek yeni bakış açıları ve deneyler ileri sürmelerinde yatar. İşte size en iyi hipotezlerden biri; mucit bir zihinden, Queen Mary Londra Üniversitesi'nde biyokimya profesörü John Allen'dan çıkmış güzel bir fikir. Allen'ın peş peşe üç kitabımda kendisinden bahsettiğim tek kişi olmak gibi şaibeli bir ayrıksılığı var. Her birinde farklı, cıgır açıcı bir fikrinden bahsetmiştim. Bilimdeki en iyi fikirler gibi bu hipotezin de karmaşıklık katmanlarını çabucak kesip geçen bir yalınlığı var. Doğru olmaya bilir, bilimdeki en iyi fikirlerin hepsi doğru değildir. Ama yanlış olsa bile, şeylerin nasıl oldukları gibi olabileceklerini gösterir ve bunu sınayacak bazı deneyler önererek araştırmacılara doğru yönde kılavuzluk eder. Hem kavrayış hem harekete geçme gücü verir.

Allen, birçok bakterinin çevrelerindeki değişikliklere cevap genlerini açıp kapadıklarını söyler, bu herkesin bildiği bir şeydir. Böyle bir cevaba neden olabilecek en önemli çevresel et-

kilerden biri hammaddelerin varlığı ya da yokluğudur. Bakteriler genel olarak, ortada hammadde yoksa hammadde işleyecek yeni proteinler yapmaya enerji harcamazlar, bir değişiklik haberi gelinceye kadar işleri askıya alırlar. Bu yüzden de Allen değişken bir ortam resmeder: Muhtemelen sığ denizlerde, dünyaya hidrojen sülfür salan bir hidrotermal menfezin yakınlarındaki bir stromatolit. Gelgitlere, akıntılara, yılın mevsimlerine, hidrotermal faaliyete vs. göre koşullar değişiklik gösterebilir. Kritik olan, Allen'ın varsayımsal bakterilerinin bugünkü siyanobakteriler gibi her iki fotosisteme de sahip olması, ama siyanobakterilerin tersine bir seferde sadece bir sistemi kullanmasıdır. Hidrojen sülfür mevcutken, bakteriler Fotosistem I'e geçerler ve bunu kullanarak karbondioksitten organik madde üretirler. Büyümek, üremek vs. için bu maddeyi kullanırlar. Ama koşullar değiştiğinde ve stromatolitler hammaddesiz kaldıklarında, bu bakteriler Fotosistem II'ye geçer. Yeni organik madde yapımını bırakırlar, artık büyümeyiz ya da üremeyiz, ama daha iyi zamanlar gelinceye dek doğrudan ATP üretmek için güneş ışığını kullanarak kendi kendilerini ayakta tutabilirler. Her fotosistemin kendisine göre yararlı bir yönü vardır, her biri daha önce gördüğümüz gibi bir dizi basit adımla gelişmiştir.

Peki ama bir hidrotermal menfez ölürse ya da akıntılarda meydana gelen değişiklikler ortamda uzun süreli değişikliklere yol açarsa ne olur? Bakterilerin artık çoğu kez Fotosistem II'nin elektron devresine dayanması gerekir. Ama burada olası bir sorun yatmaktadır: Devre, elektron bakımından yoksul ortamlarda ağır ağır gerçekleşse bile, çevreden gelen elektronlarla tıkanabilir. Elektron devresi biraz elden ele kutu geçirmece oyununa benzer. Bir elektron taşıyıcıda elektron ya vardır ya yoktur, tıpkı müzik durduğunda bir çocuğun elinde bir kutunun ya olması ya da olmaması gibi. Ama bir yığın kutusu olan bir gözetmen düşünelim, her seferinde bir tane olmak üzere çocukların oluşturduğu çembere kutu geçirip duruyor. Sonunda bütün çocukların elinde kutu olur. Kimse elindeki kutuyu geçiremez, oyun bir karmaşayla son bulur.

Fotosistem II'de de büyük ölçüde aynı şey olur. Buradaki sorun güneş ışığına içkindir; özellikle de ozon tabakasının oluşmasından önceki devirlerde, daha fazla morötesi ışınımın deniz seviyesine nüfuz edebildiği günlerdeki güneş ışığındadır. Morötesi ışınları suyu ayırştırmakla kalmaz, başta manganez ve demir olmak üzere okyanuslarda çözülmüş metaller ve minerallerden elektron da çıkarabilir. Bu durum tam da kutu geçirmece oyunumuza son veren türden bir soruna yol açacaktır. Fotosentez II'nin elektron devresi çevreden sızan elektronlarla dolar.

Bugün deniz suyunda demir de manganez de yüksek yoğunlukta bulunmuyor, çünkü okyanuslar iyice oksitlenmiş halde; ama antik zamanlarda ikisi de çok boldu. Örneğin manganez deniz tabanında ilginç koni şekilli "nodüller" halinde büyük miktarlarda bulunur, köpek balıklarının dişleri gibi nesnelerin etrafında milyonlarca yıl boyunca birikmiştir. (Köpek balığı dişleri okyanus dibinin yoğun basıncına dayanabilecek, canlılara ait pek az parçadan biridir.) Deniz tabanına yayılmış bir trilyon (10^{12}) ton manganez zengini nodül olduğu sanılmaktadır, devasa, ama hiç de ekonomik olmayan bir rezerv. Güney Afrika'daki devasa Kalahari manganez yatakları (13,5 milyar tonluk cevher) gibi daha ekonomik rezervler bile 2 milyar 400 milyon yıl önce okyanuslardan geriye kalmıştır. Kısacası, bir zamanlar okyanuslar manganez doluydu.

Bakteriler için, manganez değerli bir emtiadır: Hücreleri morötesi ışınımın yıkıcı etkisine karşı koruyan bir antioksidan olarak işler. Bir manganez atomu morötesi ışınımından bir foton sogurduğunda, bir elektron çıkarır, foto-oksitlenir ve bu süreçte morötesi ışını "nötralize" eder. Hücrenin, proteinler ve DNA gibi daha önemli parçaları yerine manganez "kurban edilmiştir", aksi takdirde bu daha önemli parçalar ışınlarla parçalanabilir; bu yüzden de bakteriler manganezi kollarını açarak karşılar. Sorun şudur ki bu manganez atomları bir elektron çıkardıklarında, bu elektron her zaman Fotosistem II'deki "varına yoğunla sarılan cimri" klorofil biçimi tarafından büyük ihtimalle yutulacaktır. Böylece devre yavaş yavaş elektronlarla tıkanır, tıpkı bizim kutu

geçirmece oyununda çocukların kutuların altında kalması gibi. Devreyi tıkayan elektron fazlasını kusmanın bir yolu olmadıkça, Fotosistem II giderek verimsiz bir hal alır.

Bakteriler Fotosistem II'deki elektronları nasıl kusmuş olabilirlerdi? Allen'ın hipotezinin bütün dehası burada yatar işte. Fotosistem II elektronlarla doludur, Fotosistem I ise elektron eksikliği yüzünden atıl durumdadır. Bakterilerin tek yapması gereken şey, her iki fotosistemin aynı anda etkin olmasını engelleyen şeyi ya fizyolojik olarak ya da tek bir mutasyon yoluyla etkisiz hale getirmektir. Bundan sonra ne olur peki? Elektronlar, oksitlenmiş manganez atomlarından Fotosistem II'ye girer. Sonra "varına yoğun sarılan cimri" tipi klorofil, bir ışık huzmesi soğururken bu elektronlar da yüksek bir enerji düzeyine çıkarılırlar. Buradan elektron nakil zincirine geçerler ve enerji salarak küçük bir miktar ATP üretirler. Sonra farklı bir şey olur. Tıkanık Fotosistem II'ye geri döneceklerine, yeni elektronlara susamış etkin Fotosistem I tarafından yutulurlar. Elektronlar bu kez, "işportacı" tipi klorofil, bir ışık huzmesi soğurduğunda yine yüksek bir enerji düzeyine fırlatılırlar. Elbette ki buradan da yeni organik madde üretimi için karbondioksite aktarılırlar.

Bütün bunlar tanıdık geliyor mu? Z şemasını yeniden be-timledim işte. Bir tek mutasyon iki fotosistemi peş peşe bağlar, elektronlar manganez atomlarından gelerek Z şeması üzerinden karbondioksite ulaşır şeker üretir. Önceden muazzam derecede dolambaçlı ve ayrıntılı görünen bir süreç şimdi birden tek bir mutasyonla neredeyse kaçınılmaz hale gelmiştir. Mantık kusursuzdur, moleküler parçaların hepsi yerli yerindedir, hepsi de ayrı ayrı birimler olarak bir amaca hizmet eder. Çevresel baskılar akla yatkın ve öngörülebilirdir. Tek bir mutasyon dünyada bundan daha büyük bir değişiklik meydana getirmemiştir!

Büyük tablonun hakkını rahatça verebilmek için hızlı bir tekrarda yarar var. Başta tek bir fotosistem vardı, muhtemelen güneş ışığı kullanarak hidrojen sülfürden elektron çekiyor, sonra bunları karbondioksite göndererek şeker ürettiyordu. Bir gün bu gen, herhalde siyanobakterilerin atası olan bir bakteride kopyalandı

ve ikilendi. İki fotosistem farklı kullanımlarla birbirinden ayrışıp farklılaştı.⁹ Fotosistem I tam olarak önceden yaptığı şeyleri yapmayı sürdürürken, Fotosistem II bir elektron devresi sayesinde güneş ışığından ATP üretiminde uzmanlaştı. İki fotosistem ortama göre açılıp kapanabiliyordu, ama ikisi aynı anda hiç çalışmıyorlardı. Ne var ki zamanla Fotosistem II'de bu elektron devresinin özelliklerinden kaynaklanan bir sorun ortaya çıktı, çevreden gelen fazladan elektron girdisi devreyi tıkıyordu. Muhtemelen bakterilerin morötesi ışınımından korunmak için kullandığı manganiz atomlarından, yavaş ama sürekli bir elektron girdisi oluyordu. Bir çözüm açma kapamayı etkisiz hale getirmek, iki fotosistemin de aynı anda çalışmasını sağlamaktı. Elektronlar bu durumda manganizden gelip bütün ilginç ayrıntılarıyla dolambaçlı Z şemasının öncülü olan karmaşık bir yolu kullanarak her iki fotosistemden de geçip karbondioksit varacaktı.

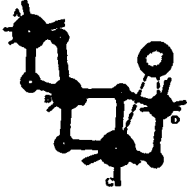
Tam oksijenik fotosentezle aramızda bir adım bulunuyor şu anda. Sudan değil manganizden elektron çekiyoruz. Peki ama nihai değişim nasıl ortaya çıktı? Şaşırtıcı cevap şudur: Hemen hemen hiçbir şeyin değişmesine gerek yoktu ki.



Oksijen evriltme kompleksini, elektronları tek tek çıkarmak için suyu "öylece" alan bir ceviz kırma aygıtına benzetmiştik. Bütün elektronlar alındığında, değersiz atık oksijen dünyaya atılır. Oksijen evriltme kompleksi aslında Fotosistem II'nin bir parçasıdır, ama en kenardadır, yüzü dış dünyaya dönüktür ve sonradan eklenmiş hissi verir. Hayret verici derecede küçüktür. Bu kompleks oksijen atomlarından bir kafesle çevrilmiş ve birbirine bağlanmış dört manganiz atomuyla tek bir kalsiyum atomundan oluşan bir topluluktur. İşte o kadar.

Birinci ve ikinci bölümlerde tanıştığımız baş edilemez Mike Russell birkaç yıl boyunca, bu kompleksin yapısının hidrotermal menfezlerde pişen *ranciéite* ya da tünel kalsiyum manganit (CaMn_4O_8) gibi bazı minerallere dikkat çekici bir benzerlik gösterdiğini savunup durdu. Ama 2006'ya kadar bu manganiz top-

luluğunun atomik düzeydeki yapısını bilmiyorduk, Russell'ın sesi de yabanda bir çığlık olarak kalıyordu. Ama artık biliyoruz. Russell tam olarak haklı olmasa da, geniş kapsamlı kavrayışı kesinlikle doğrudur. Berkeley'de Vittal Yachandra başkanlığındaki



Şekil 3.4 Oksijen evriltme kompleksinin antik mineral yapısı. X ışını kristalografisinin ortaya koyduğu üzere oksijenin bir kafes şeklinde bağlandığı dört mangan atomu yakınındaki bir kalsiyum atomuyla birleşir.

bir ekibin ortaya çıkardığı üzere, bu yapı Russell'ın ileri sürdüğü mineral biçimleriyle çarpıcı bir benzerlik taşır. (Şekil 3.4)

Başlangıçta oksijen evriltme kompleksi sadece Fotosistem II'yle birleşmiş bir mineral parçası mıydı, bunu bilmiyoruz. Belki de mangan atomları morötesi ışınımıyla oksitlenirken bir kafes içinde oksijene bağlanmış, oracıkta minicik bir kristal büyümesinin nüvesi olmuşlardı.¹⁰ Belki de bu topluluğun klorofile ya da bitişik protein parçalarına yakınlığı onu bir biçimde bozmuş, işleyişini en uygun hale getirmişti. Ama bu yapı, kökeni ne olursa olsun, tesadüfi olduğuna dair güçlü bir his uyandırır. Bir biyoloji ürünü olamayacak kadar mineral yapıya yakındır.

Enzimlerin kalbinde bulunan başka birkaç metal topluluğu gibi, bu da milyarlarca yıl önce bir hidrotermal menfezde bulunan koşulları neredeyse kesinlikle yansıtır. Bütün mücevherlerin en değerlisi olan bu metal topluluğu, bir proteine sarılmış ve ebediyen siyanobakterinin emaneti olmuştur.

Nasıl olmuş olursa olsun, bu küçük mangan atomları topluluğu sadece ilk kez onu kapana kısıran bakteriler için değil, gezegenimizdeki hayatın tamamı için yeni bir dünya açmıştır. Bu küçük atom topluluğu oluşur oluşmaz suyu ayrıştırmaya başlamıştır, oksitlenmiş dört mangan atomu sudan elektron çekme, atık olarak oksijen salma isteklerini birleştirmiştir. Morötesi ışınının tetikleme üzerine manganın oksitlenmesiyle

harekete geçen suyun ayrıştırılma süreci başta yavaş ilerlemiş olsa gerektir. Ama yapı klorofille birleşik hale gelince, elektronlar akmaya başlamıştır. Klorofil işine uyarlandıkça bu işlem hızlanmış, su içeri çekilmiş, açılmış, elektronları çekilmiş, oksijen bertaraf edilmiştir. Dünyanın hayatla dolup taşmasının ardında, sudan gelen, bir zamanlar damla olup nihayetinde sele dönüşen bu hayat verici elektron akışı vardır. Ona iki kere teşekkür etmemiz gerekiyor, bir kere bütün besinimizin nihai kaynağı olduğu için, bir kere de hayatta kalmak için o gıdayı yakarken ihtiyaç duyduğumuz bütün oksijeni sağladığı için.

Bu ayrıca dünyanın enerji krizinin de anahtarıdır. Bizim iki fotosisteme ihtiyacımız yok, çünkü organik madde yapımıyla ilgilenmiyoruz. Bizim sadece sudan salınan iki ürüne, oksijen ve hidrojene ihtiyacımız var. Bunların bir arada tepkimeye girmesi, ihtiyaç duyduğumuz bütün enerjiyi üretir ve tek atık da su olur. Başka bir deyişle, bu küçük manganer topluluğuyla güneş enerjisini, suyu ayırtmak, sonra ürünleri yeniden tepkimeye sokup yeniden su üretmek için kullanabiliriz: Hidrojen ekonomisi budur işte. Kirlilik olmaz, fosil yakıt olmaz, karbon ayak izi olmaz, insan kaynaklı küresel ısınma olmaz; yine de biraz patlama tehlikesi olabilir. Bu küçük atom topluluğu uzun zaman önce dünyanın düzenini değiştirdiyse, bu topluluğun yapısını bilmek bugün dünyamızı şekillendirmekte ilk adımımız olmalıdır. Bu satırları yazdığım sırada, dünyanın dört bir yanında kimyagerler bu küçük manganer topluluğunu ya da aynı işi görecektir benzer bir şeyi laboratuvarında sentezlemek için birbirleriyle yarışıyor. Hiç kuşku yok ki kısa süre sonra başaracaklar. Ondan sonra da suyla ve bir parça güneş ışığıyla yaşamayı öğrenmemiz pek de uzun sürmeyecek.

Karmaşık Hücre

Talibli Bir Karşılaşma



Aynı zamanda bir botanikçi olan İsveçli büyük taksonomist Carl Linnaeus, "Botanikçi, herkesin anlayabilmesi için benzer sebzelere benzer isimler, farklı sebzelere farklı isimler veren kişidir," gözleminde bulunmuştu. Böyle sınırlı bir hevesle karşılaşmak bugün bize şaşırtıcı gelebilir, ama Linnaeus yaşayan dünyayı türlerin özelliklerine göre sınıflandırarak modern biyolojinin temellerini atmıştı. Hiç kuşku yok ki başarılarından gurur duyuyordu. "Tanrı yaratır, Linnaeus düzenler," demeyi severdi; bilim insanlarının, onun bütün hayatı alemlere, şubelere, sınıflara, cinslere ve türlere ayıran sistemini hâlâ kullanıyor olduğunu bilse bunu hiç kuşkusuz gayet yerinde bulurdu.

Bu sınıflandırma, kargaşadan düzen çıkarma dürtüsü dünyayı anlamlandırmaya başlar ve birçok bilimin kökeninde yatar. Periyodik tablo olmasaydı kimya nerede olurdu? Peki ya çağlar, devirler olmasa jeoloji nerede olurdu? Ama biyoloji alanında çarpıcı bir farklılık gözlenir. Sadece biyolojide, bu tür bir sınıflandırma, ana araştırmaların hâlâ faal bir bölümünü oluşturmaktadır. Yaşayan bütün organizmaların birbiriyle ilgisini ortaya koyan o büyük grafik, "hayat ağacı"nın nasıl bir yapısı olduğu sorusu, normalde akliselim bilim insanları arasında bir kin, hatta öfke kaynağıdır. Bilim insanlarının en naziklerinden biri olan Ford Doolittle'ın kaleme aldığı bir makale bu haletiruhiyeyi baş-

lığıyla aktarıyor: “Hayat ağacına baltayı indirmek”.

Sorun sır dolu inceliklerle değil, bütün ayrımların en önemlisiyle ilgilidir. Linnaeus gibi çoğumuz hâlâ dünyayı içgüdüsel olarak bitkiler, hayvanlar ve mineraller diye ayırıyoruz, nihayetinde görebildiğimiz şeyler bunlardır. Daha farklı ne olabilir ki? Hayvanlar incelikli sinir sistemlerinin rehberliğinde bitkileri ve başka hayvanları yiyerek etrafta dolanır. Bitkiler güneş ışığının enerjisini kullanarak karbondioksit ve sudan kendi maddelerini elde ederler, bulundukları yere kökleriyle bağlıdırlar, bir beyne ihtiyaçları yoktur. Minerallere gelince; kristallerin büyümesi Linnaeus’u biraz mahcubiyetle, hazır uğraşıyorken onları da sınıflandırmaya ikna etmiş olsa da, açıktır ki mineraller cansızdır.

Bir konu olarak biyolojinin kökenleri de zooloji ve botanik olarak ayrılır, kuşaklar boyunca da bu ikisi asla birleşmemiştir. Mikroskobik hayat biçimlerinin keşfedilmesinin bile bu eski ayrımın ortadan kalkmasına pek yararı olmamıştır. Amip gibi hareket eden “mikroskobik hayvanlar” hayvanlar alemine gönderilmiş, daha sonra da *protozoa* (“ilk hayvanlar” anlamında) adını almıştır, renkli algler ve bakterilerse bitkiler arasına dahil edilmiştir. Linnaeus, sisteminin hâlâ kullanıldığını görmekten memnun olsaydı bile, dış görünüme bakarak ne kadar aldandığını görmek onu hayrete düşürürdü. Bugün bitkiler ile hayvanlar arasındaki mesafenin çok dar olduğu düşünülmektedir, bakteriler ile karmaşık hayatın geri kalan kısmı arasındaysa korkutucu bir uçurum açılmıştır. Bilim insanları arasında bu kadar fazla görüş ayrılığına neden olan şey de bu uçurumun aşılması meselesidir: Hayat, bakterilerin ilkel yalınlığından bitkiler ve hayvanların karmaşıklığına nasıl geçmiştir? Bu hep olması muhtemel bir şey miydi, yoksa sarsıcı derecede imkansız mıydı? Evrenin başka bir yerinde de olabilir mi, yoksa tek başımıza mı sayılırız?

Meseleyi halletmek için işe “biraz Tanrı eklemek” isteyeceklerin ekmegine yağ sürülmesin diye belirtelim, akla yatkın fikirler konusunda bir kıtlık yoktur: Sorun kanıtlarda, özellikle de derin zamanla, muhtemelen ilk karmaşık hücrelerin ortaya çıktığının sanıldığı 2 milyar yıl öncesiyle ilgili kanıtların yorumlanmasında

yatar. Bütün bu meselelerle ilgili en derin soru, karmaşık hayatın, gezegenimizin hayatında neden sadece bir kez doğmuş olduğu sorusudur. Bütün bitkiler ve hayvanlar hiç kuşkusuz birbiriyle ilişkilidir, yani hepimiz ortak bir atayı paylaşırız. Karmaşık hayat bakterilerden tekrar tekrar ve farklı zamanlarda ortaya çıkmamıştır, bitkiler bir bakteri türünden, hayvanlar bir başka bakteri türünden, mantarlar ya da algler başka bakteri türlerinden gelmemiştir. Tam tersine, karmaşık hayat sadece bir kez bakterilerden doğmuş ve bu hücrenin torunları karmaşık hayatın bütün büyük alemlerini kurmuştur: bitkiler, hayvanlar, mantarlar ve algler. Bütün karmaşık hayatın atası olan bu ata hücre, bir bakteriden çok farklıdır. Hayat ağacını düşünürsek, bakteriler kökleri, aşına olduğumuz karmaşık organizmalar da dalları oluşturuyor gibidir. Peki ama ağacın gövdesine ne olmuştur? Amip gibi tek hücreli protistleri ara biçimler olarak değerlendirebilirsek de, aslında bunlar birçok bakımdan en az bitkiler ve hayvanlar kadar karmaşıktır. Daha alt bir dalda yer aldıklarına hiç kuşku yoktur, ama yine de gövdenin hayli üstünde bir yerdedirler.

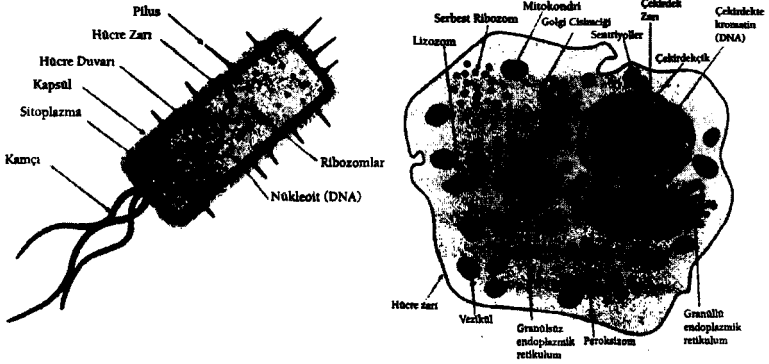
Bakteriler ile başka her şey arasındaki mesafe, hücreler düzeyinde bir örgütlenme meselesidir. En azından morfolojileri (şekilleri, büyüklükleri ve içerikleri) itibarıyla, bakteriler basittir. Şekilleri genellikle yalındır: Genellikle küreler ya da çubuklar halindedirler. Bu şekil, hücrenin dışındaki sert bir hücre duvarıyla desteklenir. İçerde bir elektron mikroskobunun gücüyle bile görece az şey vardır. Bakteriler, serbest bir hayat tarzına uyumlu asgari gereklerle sınırlanmışlardır. Acımasızca hızlı olacak şekilde tasarlanmışlardır, her şeyleri hızlı kopyalanmaya ayarlanmıştır. Birçoğu, olabildiğince az gen taşır, baskı altında kaldıklarında başka bakterilerden fazladan gen almaya, genetik kaynaklarını güçlendirmeye bir yatkınlıkları vardır, sonra ilk fırsatta yine bunları kaybederler. Küçük genomlar hızla kopyalanır. Bazı bakteriler her 20 dakikada bir kopyalanırlar, bu da hammaddeler var olduğu sürece dudak uçuklatacak kadar hızlı bir şekilde katlanarak çoğalmalarını sağlar. Bir gramın trilyonda biri ağırlığındaki bir bakteri, yeterince kaynak verildiğinde (im-

kansız bir talep olduğu aşıkardır) iki günden kısa bir süre içinde dünyanın kendisi kadar ağır bir nüfusa ulaşabilir.

Şimdi bir de ökaryot gibi oturaklı bir isme sahip karmaşık hücreleri düşünelim. Keşke daha sıcak bir isimleri olsaydı, çünkü önemlerini kimse inkar edemez. Bu dünyada bir şey olan her şey, bahsettiğimiz bütün hayat biçimleri ökaryottur. Bu isim Yunancadan gelir, “eu” (ö) “gerçek” demektir, “karyote” (karyot) ise “çekirdek” anlamına gelir. O halde, ökaryot hücrelerin onları bakterilerden ayıran gerçek bir çekirdekleri vardır, bakterilere bir çekirdekleri olmadığı için “prokaryot” denmiştir. Bir anlamda, “pro” öneki bir değer yargısıdır, çünkü prokaryotların ökaryotlardan önce evrildiğini ima eder. Bunun neredeyse kesinlikle doğru olduğu kanısındayım, ama bazı araştırmacılar bu fikre katılmayacaktır. Kesin olarak ne zaman evrildiği bir yana, çekirdek bütün ökaryot hücrelerin belirleyici özelliğidir, çekirdeğin nasıl ve neden ortaya çıktığını, neden hiçbir bakterinin gerçek bir çekirdek geliştirdiğini anlamadan ökaryot hücrelerin evrimini açıklamayı bekleyemeyiz.

Çekirdek, hücrenin “komuta merkezi”dir ve genlerin malzemesi olan DNA’yla doludur. Varoluşunun ötesinde, ökaryot çekirdeğin bakterilere yabancı olan birkaç yönü daha vardır. Ökaryotların bakteriler gibi tek bir dairesel kromozomu yoktur, onun yerine genellikle çiftler halinde bulunan birkaç doğrusal kromozomu vardır. Genler, bakterilerde olduğu gibi ipe dizilmiş boncuklar misali kromozoma asılı halde değildirler, parçalara ayrılmışlardır, aralarında büyük miktarda şifreleyici olmayan DNA bulunur; biz ökaryotların kimbilir hangi sebepten “parçalı genleri” vardır. Son olarak, bizim genlerimiz bakterilerinki gibi “çıplak” değildir, büyüleyici bir şekilde proteinlerde bağlıdır, modern naylon paket kağıtları gibi dışarıdan müdahalelere dayanıklı bir düzenlemedir bu.

Ökaryot hücreler çekirdeğin dışında da dünyalar kadar büyük farklılıklar gösterir (Şekil 4.1). Genellikle bakterilerden çok daha büyüktürler, ortalama olarak onların hacminin 10.000 ila 100.000 katı kadardır. Sonra envai çeşit şeyle doludurlar: zar



Şekil 4.1 Bakteriler gibi prokaryot hücrelerle içlerinde bir çekirdek, organeller ve iç zar sistemleri dahil "bir şeyler" bulunan karmaşık ökaryot hücreler arasındaki farklar. Bu şema ölçüğe uygun olarak çizilmemiştir, ökaryotlar bakterilerinkinden yaklaşık 10.000 ila 100.000 kat daha fazla hacme sahiptir.

yığınları, bol miktarda kapalı kesecik ve yapısal destek sağlayan, hem parçalanıp hem de kendini yeniden kurabilen, şekil değişikliklerini ve hareket etmeyi mümkün kılan dinamik bir hücre içi iskeleti. Herhalde en önemli farklılık organellerdir, tıpkı böbrek ya da karaciğerin insan bedeninde uzmanlaştıkları işleri gerçekleştirmeleri gibi, hücre içinde de belli işleri gerçekleştirmekle görevli olan mikroskobik organlardır bunlar. Bunların en önemlileri, hücrenin "santrali" olarak bilinen, ATP biçiminde enerji üreten mitokondrilerdir. Ortalama bir ökaryot hücrede birkaç yüz mitokondri bulunur, ama bazı hücreler yaklaşık 100.000 mitokondri içerir. Bir zamanlar mitokondriler serbest yaşayan bakterilerdi, onların hücreye kısıli kalmalarının sonuçları da bu bölümde epey yer işgal edecek.

Bütün bu bahsettiklerimiz sadece görünümdeki farklılıklardır. Davranış açısından ökaryot hücreler bakteriler kadar ilginç, ama yine onlardan tümüyle farklıdır. Deyim yerindeyse, birkaç önemsiz istisna dışında, pratikte bütün ökaryotların cinsiyeti vardır: Sperm ve yumurta gibi cinsiyet hücreleri üretirler, bunlar birleşerek genlerinin yarısını babadan, yarısını anneden alan melez bir hücre üretir; gelecek bölümde bu konunun üzerinde daha fazla duracağız. Bütün ökaryot hücreler kromozomların bu-

yüleyici bir dansıyla bölünür, kromozomlar eşlenir ve bir mikrotübül eksenini boyunca dizilir, sonra da sanki eğilip selam verirmiş gibi hücrenin uçlarına çekilirler. Ökaryot hücrelerin başka ilginç yönleri de vardır, bir tanesinden daha bahsetmek istiyorum: fagositoz, yani koca koca hücreleri yalayıp yutma ve sindirme becerisi. Öyle görünüyor ki bu kadim bir özelliktir, mantarlar ve bitkiler gibi birkaç grup bu özelliği kaybetmiştir. Örneğin, çoğu hayvan ve bitki hücresi etrafı dolaşıp başka hücreleri yutmasa da, bağışıklık hücreleri, bakterileri tükettiklerinde amiplerin bu iş için kullandığı aygıtın aynısını kullanarak tam da bunu yaparlar.

Bu anlattıklarımızın hepsi bitki, hayvan ya da amip olsun bütün ökaryot hücreler için geçerlidir. Aralarında elbette bazı farklılıklar da vardır, ama ortak özellikleri dikkate alındığında bunlar önemsiz kalır. Örneğin, birçok bitki hücresinde kloroplast, yani fotosentezden sorumlu organeller bulunur. Mitokondriler gibi kloroplastlar da bir zamanlar serbest yaşayan, bütün bitkiler ve alglerin ortak bir atası tarafından bütün halde yutulmuş bakterilerdi (bu örnekte siyanobakterilerdi). Kim bilir hangi sebepten bu ata hücre akşam yemeğini sindiremedi ve bir hazımsızlık vakası yüzünden kendi kendisine yeterli olmak, enerjisini sadece güneş, su ve karbondioksitten almak için gerekli her şeye sahip oluverdi. Bir tek yutkunmayla, bitkilerin hareketsiz dünyasını hayvanlar dünyasının dinamizminden ebediyen ayıran koşullar dizisini harekete geçirdi. Ama bir bitki hücresinin içine baktığımızda, bunun binlerce ortak özelliğin yanında tek bir farklılık olduğunu görürsünüz. Devam edebiliriz. Bitkiler ve mantarlar yapılarını güçlendirmek için dış hücre duvarlarını inşa ederler; bazılarının kofulları vardır, vs. Ama bunlar önemsiz farklılıklar olmaktan öteye geçmez, çünkü hiçbir şey ökaryot hücreleri bakterilerden ayıran boşluğa benzemez.

Ama bu muzip bir boşluktur, hem gerçektir hem hayalî. Değerlendirdiğimiz özelliklerin hemen hepsinde, bakteriler ile ökaryot hücreler arasında bir ölçüde örtüşme söz konusudur. Birkaç büyük bakteri vardır, birçok da minicik ökaryot: Büyük-lük yelpazeleri örtüşür. Bakterilerin, hücre duvarının yanı sıra

ökaryot hücre iskeletine çok benzer iplikçiklerden oluşan bir hücre içi iskeletleri vardır. Hatta bir noktaya kadar bu iskeletin dinamik olduğu görülmektedir. Dairesel değil doğrusal kromozomları olan, içlerinde bir çekirdeği andıran yapılar bulunan, iç zarlara sahip bakteriler vardır. Birkaçında, en azından hayat döngülerinin bir kısmı boyunca hücre duvarı bulunmaz. Bazıları, hiç kuşku yok ki bakteri savunucularına göre çok hücreli organizma olduğu söylenebilecek incelikli kolonilerde yaşar. Hatta içlerinde, çok daha küçük bakteriler taşıyan bir-iki bakteri örneği bile vardır, bilinen hiçbir bakterinin fagositoz yoluyla hücreleri yutamayacağı dikkate alındığında soru işaretleri yaratan bir bulgudur bu. Ben bakterilerin ökaryot özelliklerin göstermeye başladıkları, ama daha sonra bir sebepten ilerleyemedikleri, bu deneyi sürdüremedikleri kanısındayım.

Hiç de mantıksız denilemeyecek bir düşünme biçimiyle, bir örtüşmenin, bir süreklilikle aynı şey olduğunu, dolayısıyla açıklayacak bir şey olmadığını söyleyebilirsiniz, yelpazenin bir ucunda yer alan basit bakterilerden öbür uçtaki karmaşık ökaryotlara bir süreklilik varsa, bakteriler ile ökaryotlar arasında hiç boşluk olmayabilir. Bu bir anlamda doğrudur, ama ben yanıltıcı olduğunu da düşünüyorum, çünkü bir dereceye kadar örtüşme olsa da aslında iki ayrı yelpazenin örtüşmesi söz konusudur: Bakteriler için “aşırı yalınlık”tan “sınırlı karmaşıklığa” uzanan budanmış bir yelpaze, ökaryotlar içinse “sınırlı karmaşıklık”tan “kafa karıştırıcı bir karmaşıklığa” uzanan son derece uzun bir yelpaze. Evet, bir örtüşme vardır, ama bakteriler ökaryot sürekliliğinde hiçbir zaman çok yukarı çıkamamışlardır, sadece ökaryotlar bunu yapabilmıştır.

Tarih, bakteriler ile ökaryot hücreler arasındaki bu farklılığı kuvvetli bir biçimde gösterir. Dünya üzerindeki hayatın yaklaşık olarak ilk 3 milyar yılı boyunca (4 milyar yıl öncesiyle 1 milyar yıl öncesi arasında) dünyaya bakteriler hakimdi. Dünyalarını çok değiştirmişler, ama kendilerini pek değiştirmemişlerdi. Bakterilerin yarattığı çevresel değişiklikler muhteşemdir, biz insanların anlamakta zorlanacağı bir düzeydedir. Örneğin, havadaki oksi-

jenin tamamı fotosentezden kaynaklanır, dünyanın ilk zamanlarında da sadece siyanobakterilerden kaynaklanmıştır. “Büyük oksidasyon olayı”, yaklaşık 2 milyar 200 milyon yıl önce hava ile okyanusların güneş ışığı vuran yüzeylerinin oksijenle dolup taşması, gezegenimizin yapısını ebediyen değiştirdi; ama bu değişim bakterileri pek de etkilemedi. Sadece ekolojide, oksijeni seven bakterilere doğru bir değişim oldu. Bir bakteri tipi diğerlerinden daha fazla kayırıldı, ama hepsi de kesinlikle bakteri olarak kaldı. Aynı şey, koşullardaki diğer devasa değişiklikler için de geçerlidir. 2 milyar yılcık boyunca okyanusların derinliklerinin hidrojen sülfüre boğulmasının ardında da bakteriler vardır; ama bakteriler her zaman bakteri olarak kalmıştır. Atmosferdeki metanın oksitlenmesinin, küresel bir donmanın başlamasının, ilk kartopu dünyanın oluşmasının ardında bakteriler vardır; ama onlar hep bakteri olarak kalmıştır. Herhalde hepsinin içinde en önemli değişim, son 600 milyon yıl içinde karmaşık çok hücreli ökaryotların yükselişi sayesinde ortaya çıkmıştır. Ökaryotlar bakterilere, salgın hastalıklara yol açmak gibi yeni yaşam yolları sunmuşlardır; ama bakteriler yine de bakteriydi. Hiçbir şey bir bakteriden daha muhafazakar olamaz.

Böylece ökaryotlarla birlikte tarih başladı. İlk kez, her şeyin kesintisiz bir aynılık içinde olması yerine, “bir kahrolası şeyin yerine bir başkasının gelmesinden” mustarip olmak mümkün hale geldi. Birkaç kere olaylar müthiş bir hızla gelişti. Örneğin Kambriyen patlaması, ökaryotlarla ilgili arketip niteliğinde bir gelişmedir. Büyük hayvanlar ilk kez o an (muhtemelen birkaç milyon yıl süren jeolojik bir an) birden fosil kayıtlarında somutlaştı. Bunlar morfolojik olarak belirsiz biçimler değildi; öyle sürüne sürüne bir ilerleme değil, tuhaf bedensel planların kedi yürüyüşüyle yaptığı hayret verici bir geçit töreni söz konusuydu; bu hayvanların bazıları ortaya çıkar çıkmaz kaybolmuştu. Sanki dengesiz bir yaratıcı ırkilerek uykusundan uyanmış, kaybedilen onca zamanı telafi etmek için kolları sıvamıştı.

Böyle bir patlama için kullanılan teknik terim “ışırma”dır, bir “ışırma” sırasında belli bir biçim, bir sebepten birden yükselişe

geçer ve kısa süreli dizginlenemez bir evrim sürecine girer. Tıpkı bir tekerleğin üzerindeki çubuklar gibi, ata biçimden yenilikçi yeni biçimler ısrır. Kambriyen patlaması en iyi bilinen ışıma olsa da, daha başka birçok örnek vardır: hayatın karaya çıkması, çiçekli bitkilerin yükselişi, otların yayılması, memelilerin çeşitlenmesi bunlardan sadece birkaçıdır. Bu olaylar, genetik vaatler çevresel fırsatlarla yüz yüze geldiğinde ortaya çıkma eğilimi gösterir, kitlesel bir tükenme olayı sonrasında olduğu gibi. Ama sebebi ne olursa olsun, bu gibi muazzam ışımlar benzersiz bir biçimde ökaryottur. Her seferinde sadece ökaryot organizmalar serpilip gelişmiştir, bakterilerse her zaman olduğu gibi bakteri olarak kalmıştır. İnsan zekasının, bilincinin, bu kadar aziz tuttuğumuz ve evrende başka yerlerde aradığımız bütün özelliklerin bakterilerde ortaya çıkamayacağı sonucuna varmak zorunda kalıyoruz; en azından dünyada bunlar sadece ökaryotlara özgü özelliklerdir.

İnsanın aklını başına getiren bir ayrımdır bu. Bakteriler biz ökaryotları biyokimyalarının akıllığından ötürü mahcup etseler de, morfolojik potansiyelleri bakımından cidden güdük kalmışlardır. Öyle görünüyor ki bakteriler, ister ebeğümeci ister sinekkuşu olsun, etrafımızda gördüğümüz bütün bu harikaları ortaya çıkarma yetisine sahip değillerdir. Bu da basit bakterilerden karmaşık ökaryotlara dönüşümü, herhalde gezegenimizin tarihindeki tek önemli olay haline getirir.



Darwinciler boşluklardan pek hoşlanmaz. Doğal seçilimin, her biri kendisinden öncekinin biraz gelişmiş küçük adımlardan oluşan tedrici bir dizi olarak kavranması, aslında gördüğümüzden çok daha fazla ara adım görmemiz gerektiği anlamına gelir. Darwin bu algılanan güçlüğü *Türlerin Kökeni*'nde, bütün geçici adımların, tanımları gereği, bugün etrafımızda gördüğümüz "son noktalar" kadar iyi uyum sağlayamamış olduğunu işaret ederek çözmüştü. Seçilimin doğası gereği, kötü biçimler daha iyi rakipleri karşısında kaybedeceklerdir. Açıktır ki düzgün bir

biçimde uçma becerisine sahip bir kuş, kanatlar yerine “yarım parçalar”la idare etmek zorunda olan akrabalarından daha iyi durumda olacaktır. Aynı şekilde, yeni bilgisayar yazılımları modası geçmiş versiyonları piyasadan sürüp çıkarır, öyle ya, en son ne zaman bir Windows 286 ya da 386 işletim sistemi gördünüz? Tıpkı kendi bağlamlarında prototip olan kanatlar gibi (hatta bugün uçan sincaplar ya da havada süzülen yılanlar için olduğu gibi) bir zamanlar, en son teknolojik yenilik onlardı. Ama zamanın akıp geçmesiyle birlikte, bu ilk işletim sistemleri, geride bir iz bile bırakmadan yok olup gittiler, Windows XP öncesinde belirgin bir boşluk bıraktılar arkalarında.¹ Windows işletim sistemlerinin zaman içinde iyileştiklerini kabul ederiz, ama bu evrimin kanıtını bugün kullanılan bilgisayarları karşılaştırarak ararsak, tavan arasına fırlatılmış birkaç tozlu fosil dışında pek bir işaret bulamayız. Aynı şekilde, hayatla ilgili olarak da bir sürekliliğin kanıtını bulmak istiyorsak fosil kayıtlarına, değişikliklerin gerçekleştiği dönemlere bakmamız gerekir.

Fosil kayıtları tabii ki yamalı bir görüntü sergilemektedir, ama ara biçimlerin sayısı, gürültücü bağnazların kabul etmeye yanaştıklarından çok daha fazladır. Darwin kitabını yazdığı sırada, kuyruksuz maymunlar ile insanlar arasında gerçekten de “kayıp bir halka” vardı, ara özellikleri bilinen fosil hominidler yoktu. Ama geçen yarım yüzyıl içinde, paleontologlar çok sayıda hominid fosili buldu. Genel olarak bakıldığında, bunların hepsi de beyin büyüklüğü ya da yürüme biçimi gibi bir özellikler yelpazesinde tam olarak bulunmaları beklenen yere düşüyordu. Bugün, ara biçimlerin yokluğu bir yana, zenginliğinin mahcubiyeti içindeyiz. Mesele şudur ki bu hominidlerin hangisinin, modern insanların atası olduğunu, hangilerinin bir daha görünmeden ortadan kaybolduğunu bilebilmek zordur. Çünkü, (henüz) bütün cevapları bilmiyoruz, ama kayıp halkanın hiç bulunmadığı yönünde gürültülü iddiaları hala duyuyoruz, ama bu, dürüstlük ve hakikatin ayaklar altına alınmasından başka bir şey değildir.

Bir biyokimyager olarak benim bakış açım göre, fosiller dikkat dağıtan güzel oyuncaklardır. Fosilleşmenin olanaksızlığı ve

öngörülemezliği, bunun yanı sıra kuru topraklarda yaşayan bitkiler ve hayvanlara, denizanası gibi yumuşak gövdeli yaratıklara karşı sistematik bir yanlılık gösterdiği dikkate alınır, fosillerin geçmişin kusursuz bir kaydını tutamadıklarını söyleyebiliriz. Tutsalardı, bir üçkağıtçılıktan şüphelenmemiz gerekirdi. Ara sıra bu kaydı ortaya koyduklarında, bunu koşulların mucize denecek kadar ender bir biçimde bir araya geldiği müthiş bir talihin eseri olarak kutlamamız gerekiyor, ama nihayetinde bunun doğal seçilimin asıl kanıtının hoş bir biçimde belgelenip doğrulanmasından başka bir şey olmadığını da görmeliyiz. Doğal seçilimin asıl kanıtı etrafımızdadır, bu genomik çağında, genlerin dizilimindedir.

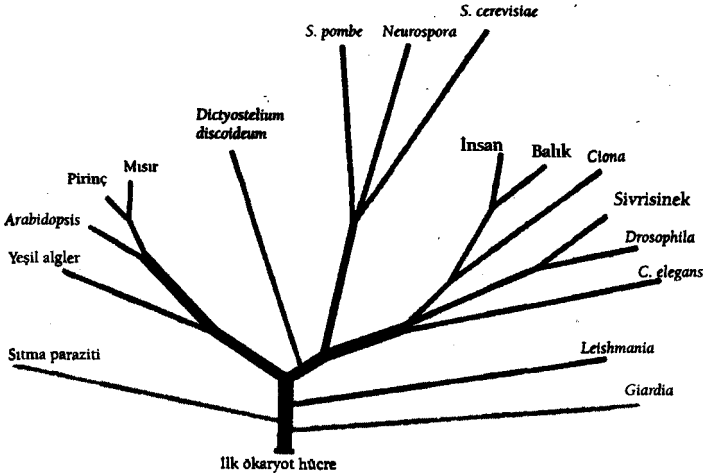
Gen dizilimleri, evrimin dokusuna, fosillerin koruyabileceğinden çok daha yakın bir şeyi korur. Hangi geni alırsanız alın, dizilimi uzun bir harfler geçididir, bu harflerin sırası bir proteindeki amino asitlerin dizilimini şifreler. Bir proteinde genellikle birkaç yüz amino asit bulunur, bunların her biri DNA'daki üç harfle şifrelenmiştir (ikinci bölüme bakınız). Daha önce belirttiğimiz üzere, ökaryot genlerinde genellikle hiçbir şey şifrelemeyen uzun DNA parçaları vardır, bunların aralarına daha kısa şifreleyici parçalar yerleşmiştir. Hepsi bir araya geldiğinde, genin dizilimi genellikle binlerce harf uzunluğunda olur. Sonra her biri benzer biçimde düzenlenmiş on binlerce gen vardır. Neresinden bakarsanız bakın, genom milyonlarca harften oluşan bir şerittir, harflerin sıralamasının genin sahibinin evrimsel mirası hakkında söyleyecek çok şeyi vardır.

Aynı işlerden sorumlu proteinleri şifreleyen aynı genlere, bakterilerden tutun insanlara kadar çok çeşitli türlerde rastlanır. Evrimsel zaman boyunca, gen dizilimindeki zararlı mutasyonlar seçimle ayıklanmıştır. Bunun, bir gen diziliminde aynı harflerin eşdeğer konumlarda korunması gibi bir etkisi olmuştur. Tümüyle pratik bir bakış açısıyla bu durum, akla hayale sığmayacak kadar uzun bir zamanın geçmesine rağmen, farklı türlerde birbiriyle ilişkili genleri tanıyabileceğimiz anlamına gelir. Ama bir kural olarak, bir gendeki binlerce harfin sadece küçük

bir bölümü özellikle önemlidir; geri kalan kısım, mutasyonların zaman içinde çoğalmasıyla birlikte az çok serbestçe değişebilir, çünkü değişikliklerin fazla bir önemi yoktur, bu yüzden de seçimle elenmezler. Aradan ne kadar çok zaman geçerse, bu mutasyonlar o kadar birikir ve birbirinden o kadar farklı iki gen dizilimi ortaya çıkar. Şempazeler ve insanlar gibi nispeten yakın tarihli ortak bir atadan gelen türlerin ortak birçok gen dizilimi vardır, papatyalar ve insanlar gibi ortak ataları daha uzak olan türlerinse ortak gen dizilimleri daha azdır. Bu durum ilkesel olarak daha çok dillere benzer, diller de zamanla birbirlerinden ayrılmışlar, ortak atalarına benzerliklerini hızla yitirmişlerdir, ama birkaç gizli benzerlik noktası onları hâlâ birbirine bağlar.

Gen ağaçları, türler arasında gen diziliminde gözlenen farklılıklara dayanır. Mutasyonların birikmesi sürecinde bir ölçüde rastgelelik söz konusu olsa da, bir ilişki olasılığı istatistiğine dayanarak, binlerce harf üzerinden ortalama alınrsa bu birikim dengelenir. Tek bir geni kullanarak, bütün ökaryot organizmaların aile ağacını, fosil avcılarının en çılgın hayallerinin ötesine geçen bir kesinlikle yeniden inşa edebiliriz. Herhangi bir şüphemiz varsa, aynı analizi farklı bir genle tekrarlıyoruz ve aynı örüntünün ortaya çıkıp çıkmadığına bakarsınız. Ökaryot organizmaların yüzlerce, hatta binlerce ortak geni olduğundan, bu yaklaşım tekrar tekrar izlenebilir ve tek tek ağaçlar birbirlerinin üstüne bindirilir. Bir parça bilgisayar gücüyle, bütün ökaryot organizmalar arasındaki en olası ilişkileri veren bir “konsensüs” ağacı kurulabilir. Böyle bir yaklaşımı benimsemekle fosil kaydındaki boşluklar arasında çok büyük bir mesafe vardır: Bu yaklaşımla bitkiler, mantarlar, algler vs. ile tam olarak nasıl bir ilişkimiz olduğunu görebiliriz (Şekil 4.2). Darwin genler hakkında hiçbir şey bilmiyordu, ama Darwinci dünya görüşündeki bütün tatsız boşlukları ortadan kaldıran şey, başka her şeyden çok genlerin incelikli yapısıdır.

Buraya kadar iyi hoş da, bazı sorunlar yok değildir. Bu sorunlara büyük ölçüde, derin zaman boyunca meydana gelen değişikliklerin ölçümündeki istatistiksel hatalar neden olmuştur. Asıl sorun şudur ki DNA’da sadece dört tane farklı harf vardır,



Şekil 4.2 Alışıldagelik hayat ağacı, ortak bir atadan, muhtemelen 2 milyar yıl önce yaşamış tek hücreli bir organizmadan gelen ökaryot organizmaların farklılıkları görülüyor. Bir dal ne kadar uzun olursa, evrimsel mesafe de o kadar uzun olur, bu da genlerin daha farklı olduğu anlamına gelir.

mutasyonlar (en azından burada ilgilendiğimiz tipte mutasyonlar) normalde bir harfı bir diğerrinin yerine geçirir. Çoğu harfin yeri bir kez değişseydi bunda bir sorun olmazdı, ama evrimsel zamanın enginliği içinde birçok harfin yeri birden fazla kez değiştirilmiştir. Her değişiklik şans eseri olduğundan, bir harfin bir kere mi, beş kere mi, yoksa on kere mi değiştiğini bilebilmek zordur. Bir harf hiç değişmediyse, hiç değişmemiş olması söz konusu olabileceği gibi birkaç kez değişmiş olması da söz konusu olabilir, öyle ki her seferinde ilk harfin yerine konması şansı %25 olmuştur. Bu gibi analizler istatistiksel olasılık meselesi olduğundan, alternatif olasılıklar arasında artık bir ayrım yapamadığımız bir noktaya varırız. Talih'in oyununa bakın ki istatistiksel bir şüphe denizinde debelendiğimiz nokta da, kabaca ökaryot hücrenin ortaya çıkışına tekabül etmektedir. Bakterilerden ökaryotlara kritik geçiş, bir genetik belirsizlik dalgasının altına gömülmüştür. Bu sorundan çıkmanın tek yolu, istatistiksel eleğimizi daha ince tutmak, inceleyeceğimiz genleri daha titiz seçmektir.



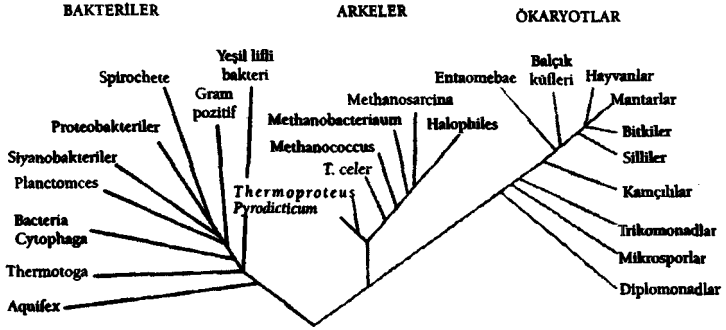
Ökaryot hücrelerde genel olarak iki gen tipi karşımıza çıkar: bakterilerdeki genlerle denkleri bulunan genler ve ökaryot hücrelere özgüymüş gibi görünen, bakteri dünyasında benzerlerine henüz rastlanmamış genler.² Bu benzersiz genler, “ökaryot imzası genleri” olarak bilinir, mirasları da tatsız bir anlaşmazlık kaynağıdır. Bazılarına göre bu genler, ökaryot aleminin de en az bakteri alemi kadar saygın olduğunun bir kanıtıdır; bu kadar çok ökaryot genin ayrık olması, kesinlikle, ökaryotların zamanın başlangıcından beri kendilerini bakterilerden uzaklaştırdığı anlamına geldiği savunulur. Ökaryot genlerin farklılaşma hızlarının sabit olduğu varsayılırsa (mutasyon hızının tek düze “tiktakları”nın molekül bir saat gibi işlediği düşünülürse) farklılıkların ölçeği ökaryotların beş milyar yıl önce, dünyanın oluşmasından yarım milyar yıl önce evrildiğine bizi inandıracak boyuttadır. İngiliz mizah dergisi *Private Eye*’in diliyle söylersek, “Hiş kuşkuşu bu işte bir hata olşa gerek”.

Bazıları da ökaryot imzası genlerinin ökaryotların evrimsel mirası hakkında hiçbir şey söylemediğini, çünkü uzak geçmişte genlerin hangi hızla evrilmiş olabileceğini hiçbir şekilde bilemeyeceğimizi, gen farklılaşmalarının saat gibi işlediğini varsaymamızı gerektirecek hiçbir şey olmadığını savunur. Bazı genlerin diğerlerinden daha hızlı evrildiğini bugün kesinlikle biliyoruz. Moleküler saatlerin böyle şaibeli bir geçmişe işaret etmesi de ya hayatın uzaydan geldiğini (kanımca bunu söylemek işin kolayına kaçmaktır) ya da saatlerin yanlış olduğunu gösterir. Peki neden bu kadar yanlış olsunlar? Çünkü genlerin evrilme hızı koşullara, özellikle de bulundukları organizmanın türüne çok fazla bağlıdır. Daha önce görmüştük: Bakteriler nihayetinde muhafazakardır, ebediyen bakteri olarak kalırlar, ökaryotlarsa Kambriyen patlamasında olduğu gibi dikkat çekici değişiklik dönemlerine açılmış gibi görünmektedirler. Genlerin bakış açısına göre, hiçbir dönem, ökaryot hücrenin oluşumundan daha dramatik olmamıştır, eğer böyleyse o ilk oluşum günlerinde değişimin ür-

kütücü bir hızda gerçekleşmesini beklemek için her tür sebep mevcuttur. Çoğu araştırmacının inandığı üzere, ökaryotlar bakterilere kıyasla daha yakın bir tarihte evrildilerse genleri de çok farklıdır, çünkü bir süre boyunca mutasyonlar geçirip, rekombinasyonlar yapıp, kopyalanıp yeniden mutasyonlar geçirerek çok hızlı evrilmişlerdir.

O halde ökaryot imza genlerinin ökaryotların evrimi hakkında söyleyecek pek az şeyi vardır, çok hızlı evrilmişlerdir ve bu zamana kadar kökenleri zamanın sisleri içinde kaybolup gitmiştir. Peki ya ikinci gen grubu, bakterilerde denklerinin olduğu bilinen genler? Bunlar daha bilgilendiricidir, çünkü benzerleri benzerlerle karşılaştırmaya başlayabiliriz. Hem bakterilerde hem ökaryotlarda bulunan genler genellikle hücre içindeki kilit süreçleri, ya kilit metabolizmayı (enerji üretimi ile amino asitler ve lipidler gibi hayatın ana yapı taşlarının inşa yolları gibi) ya da ana enformasyon süreçlerini (DNA'nın okunma ve etkin protein birimine çevrilme biçimini) şifreler. Bu gibi kilit süreçler genellikle yavaş evrilir, çünkü başka birçok şey onlara dayanır. Protein sentezinin tek bir yönünü değiştirdiğinizde, bir tek proteinin değil, bütün proteinlerin üretimini değiştirirsiniz. Benzer şekilde, enerji üretimini hafifçe değiştirseniz, hücrenin bütün işleyişini tehlikeye atabilirsiniz. Kilit genlerdeki değişikliklerin seçilimin gazabına uğraması daha büyük bir ihtimal olduğundan, bu genler yavaş evrilir, bu yüzden de bize daha incelikli bir evrim analizi sunmaları gerekir. Bu tür genlerle inşa edilmiş bir gen ağacı, prensipte, ökaryotların bakterilerle nasıl bir ilişkisi olduğunu, hangi bakteri grubundan doğduklarını, hatta neden böyle olduğuna dair bir ipucunu aydınlatılabilir.

Amerikalı mikrobiyolog Carl Woese ilk kez 1970'lerin sonunda böyle bir gen ağacı inşa etmişti. Protein sentezini gerçekleştiren, ribozom denilen minicik moleküler makinelerin bir kısmını, yani hücrenin kilit enformasyon süreçlerinden birini şifreleyen bir gen seçmişti. Woese teknik gerekçelerle genin kendisini değil, genden okunan ve doğrudan ribozoma katılan bir RNA kopyasını kullanmıştı. Çeşitli bakteriler ve ökaryotlardan



Şekil: 4.3 Ribozomal RNA'ya dayanarak hayat ağacı, Carl Woese'nin yaptığı ayırımla üç büyük canlı alemi görüldüğü: Bakteriler, arkeler ve ökaryotlar.

yalıttığı bu ribozomal RNA'nın dizilimini çıkarmış ve dizilimleri karşılaştırarak bir gen ağacı oluşturmuştu. Bulgular sarsıcıydı, yaşayan dünyanın nasıl yapılanması gerektiğine ilişkin uzun zamandır kabul gören fikirlere meydan okuyordu.

Woese, gezegenimizdeki hayatın tamamının üç büyük gruba ya da alana ayrıldığını bulmuştu (Şekil 4.3). İlk grup bekleyebileceğimiz üzere bakterilerdi, ikincisiyse ökaryotlar. Ama bir de bugün arkea olarak bilinen üçüncü bir grup vardı ki hiç yoktan ortaya çıkıp dünya sahnesinde başrole soyunmuştu. Bir yüzyıla yakın bir süre, az sayıda arkea hakkında bilgi sahibiyiz, ama Woese'nin çıkardığı yeni hayat ağacına kadar bunlar bakteriler içinde küçük bir grup olarak görülüyorlardı. Woese'den sonra, tıpatıp bakterilere benzermiş gibi görünmelerine rağmen, bunlar da en az ökaryotlar kadar önem kazandı: Miniciklerdi, genellikle bir dış hücre duvarları vardı, çekirdekleri yoktu, içlerinde üstünde yorum yapmaya degecek hiçbir şey yoktu, çok hücreli organizmayla karıştırılabilecek koloniler halinde gruplaşıyorlardı. Önemlerinin şişirilmesi birçoklarını sarsmıştı. Bu durum bitkiler, hayvanlar, mantarlar, algler ve protistlerin muhteşem çeşitliliğinin prokaryot hücrelerin baskın olduğu bir ağacın önemsiz bir köşesine atılması, dünyanın küstahça yeniden yapılandırılması

olarak yorumlanmıştı. Woese, bitkiler ve hayvanlar arasındaki çok katmanlı bütün farklılıkların, bakteriler ile arkea arasındaki görünmez uçurumun yanında solda sıfır kaldığına inanmaya zorluyordu bizi. Meşhur biyologlar Ernst Mayr ve Lynn Margulis öfkeliydi. *Science* dergisi, taraflar arasındaki keskin atışmaları yansıtırcasına yıllar sonra Woese'yi "mikrobiyolojinin yaralı devrimcisi" sözleriyle alkışlayacaktı.

Fakat bütün bunlara rağmen, çoğu araştırmacı artık Woese'nin ağacını ya da en azından arkeanın önemini kabul ediyor. Biyokimyasal bir düzeyde, arkea gerçekten de neredeyse her bakımdan bakteriden farklıdır. Hücre zarlarının bakterilerinkine benzemeyen lipidleri, farklı bir enzim kümesinin yardımıyla sentezlenir. Hücre duvarlarının bakterilerin hücre duvarlarıyla hiçbir ilgisi yoktur. Metabolik yolları bakterilerin metabolik yollarıyla pek az örtüşür. Genlerini okuma ve proteine çevirme biçimleri bile bakterilerinkine benzemez. Artık tam genom analizleri yaygın olarak gerçekleştirilebildiğinden, arkeanın genlerinin üçte birinden azının bakterilerin genleriyle ortak olduğunu biliyoruz, geri kalan genlerin hepsi arkeaya özgüdür. Neresinden bakılırsa bakılsın, Woese'nin hiç beklenmedik RNA ağacı, bakteriler ve arkea arasında, görünmezlik derecesinde gizli saklı olsalar da bir dizi büyük biyokimyasal farklılığın aydınlatılmasını sağlamıştır. Bütün bu farklılıklar da bir araya geldiklerinde, Woese'nin hayatı cesurca yeniden sınıflandırmasını desteklemektedir.

Woese'nin ağacının beklenmedik ikinci yönü, arkea ile ökaryotlar arasındaki şaşırtıcı derecede yakın ilişkidir; her ikisi de bakterilerle sadece uzaktan ilişkili ortak bir atayı paylaşmaktadır (Şekil 4.3). Başka bir deyişle, arkea ve ökaryotların ortak atası evrim sürecinde çok erken bir tarihte bakteriler arasında ayrı bir dal oluşturmuş, sonra onlardan ayrılarak modern arkea ve ökaryotları oluşturmuştur. Burada da yine, biyokimya, en azından birkaç önemli yönden Woese'nin hayat ağacını desteklemektedir. Özellikle kilit enformasyon süreçlerinde, arkea ile ökaryotların birçok ortak yönü vardır. Her ikisi de DNA'larını dikkat çekici derecede benzer proteinlere (histonlara) sarmalar, her ikisi de genlerini

benzer biçimde okur, her ikisi de ortak bir mekanizmayla protein yapar; bu süreçlerin hepsi de ayrıntıları itibarıyla bakterilerde farklılık gösterir. Bu bakımdan arkea kayıp halkayı oluşturmakta, bakteriler ile ökaryotlar arasındaki uçurumu kısmen kapatmaktadır. Esas itibarıyla, arkea görünümleri ve davranışları bakımından bakterilere yakındır, ama DNA ve proteinleri işleme biçimi bakımından şaşırtıcı derecede ökaryot özellikleri göstermektedir.

Woese'nin ağacındaki sorun, tek bir gene dayanması, bu yüzden de gen ağaçlarının üst üste bindirilmesinin getirdiği istatistiksel güçten yoksun olmasıdır. Ancak ve ancak seçilen genin ökaryot hücrelerin asıl mirasını yansıttığından emin olabilirsek, tek bir gen üzerine kurulu bir gen ağacını dikkate alabiliriz. Durumun böyle olup olmadığını sınamanın en iyi yolu, yavaş evrilen başka genleri, onların da derindeki aynı dallanma örüntüsünü gösterip göstermediğini görmek için üst üste bindirmektir. Bunu yaptığımızda, cevaplar kafa karıştırıcı bir hal alır. Sadece hayatın üç alanında ortak olan genleri (bakteriler, arkea ve ökaryotlarda bulunan genleri) seçersek, bakteriler ve arkea için güçlü ağaçlar inşa edebiliyoruz, ama ökaryotlarda böyle bir durum söz konusu olamıyor. Ökaryotlar kafa karıştırıcı bir karışımdır. Bazı genlerimiz besbelli ki arkeadan, bazıları da bakterilerden gelmiştir. Ne kadar fazla gen incelersek (kısa süre önce yapılan bir analizde 165 farklı türden alınan 5700 gen bir "süperağaç"ta birleştirilmişti) ökaryot hücrenin standart "Darwinci" bir biçimde değil, bir tür devasa gen füzyonuyla evrildiği açıklık kazanmaktadır. Genetik bir bakış açısına göre, ilk ökaryot bir kimeraydı, yani yarı arke yarı bakteriydi.



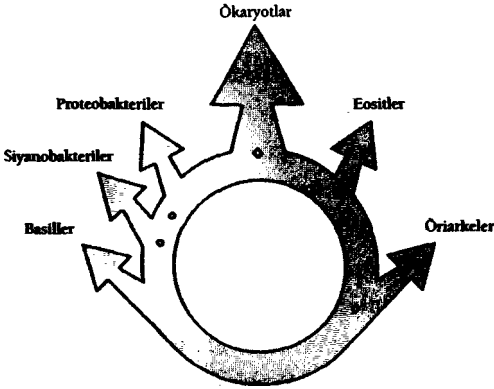
Darwin'e göre, hayat farklılıkların zaman içinde yavaş yavaş birikmesiyle, farklı soyların ortak atalarından farklılaşmasıyla evrilir. Sonuçta ortaya dallanan bir ağaç çıkar, bu tür ağaçların görebildiğimiz organizmaların çoğunun (esasen çoğu büyük ökaryotun) evrimini resmetmenin en iyi yolu olduğuna hiç kuşku yoktur. Ama bir ağacın bakteri, arkea ya da ökaryot olsun, mikropların

evrimini resmetmenin en iyi yolu olmadığı da bir o kadar açıktır.

Darwinci gen ağaçlarında karışıklığa neden olan iki süreç vardır: Yatay gen transferleri ve tam genom kaynaşmaları. Mikropların soyoluşuyla uğraşan, bakteriler ile arkea arasındaki ilişkiyi anlamaya çalışanlara göre, yatay gen transferleri sıkıntı yaratacak kadar sıktır. Biraz ağır olan bu “yatay gen transferi” terimi, genlerin para gibi bir organizmadan diğerine aktarılmasını ifade eder. Sonuçta, bir bakterinin yavrusuna geçirdiği genom kendi ebeveyninden miras aldığı genoma benzeyebilir de benzemeyebilir de. Woese’nin ribozomal RNA’sı gibi bazı genler, bir kuşaktan diğerine “dikey” olarak aktarılma eğilimi gösterir, bazıları da genellikle hayli alakasız mikroplarla takas edilir.³ Genel tablo, bir ağaç ile bir ağ arasında bir şeydir, ribozomal RNA gibi merkezî genler bir ağaç oluşturma eğilimi gösterirken, başka bazı genler bir ağ oluşturmaya meyleder. Yatay gen transferiyle karışmamış merkezî bir gen grubunun var olup olmadığı, bir çekişme konusudur. Eğer yoksa, ökaryot evriminin geriye doğru izini sürüp belli prokaryot gruplara ulaşma fikri bir saçmalık halini alır, bu gibi “gruplar”ın ancak, rastgele başka gruplar yerine büyük ölçüde kendi atalarından kalıtımla özellikler miras alması halinde tarihsel bir kimlikleri olabilir. Oysa tersine, küçük bir merkezî gen grubu hiç aktarılmıyorsa, ama başka bütün genler aktarılıyorsa, bu kimlik hakkında ne söyleyebilir ki? Genlerinin %99’u rastgele değişiyorsa, *E. coli* hâlâ *E.coli* midir?⁴

Genom füzyonları da benzer zorluklar çıkarır. Burada sorun, Darwinci ağacın tepetaklak olmasıdır, farklılaşma yerine birleşmeyle karşılaşırız. O zaman sorumuz, iki ya da daha fazla ortaklıktan hangisinin evrimin izlediği asıl yolu yansıttığı sorusuna dönüşür. Sadece ribozomal RNA geninin izini sürersek, bildik biçimde dallanan Darwinci bir ağaçla karşılaşırız; ama çok sayıda geni ya da genomun tamamını dikkate alırsak, önceden farklılaşan dalların yeniden bir araya gelip birleştiği bir halka ortaya çıkarırız (Şekil 4.4).

Ökaryot hücrenin genetik bir kimera olduğuna kuşku yoktur: Bunun kanıtını kimse sorgulamaz. Cephelere ayrılmaya ne-



Şekil: 4.4 "Hayat halkası". Bütün hayatın nihai ortak atası en altıdadır, bakteriler (solda) ve arkelere (sağda) ayrılır, bu grupların temsilcileri yeniden birleşerek yukarıdaki kimrik ökaryotları ortaya çıkarır.

den olan soru, standart Darwinci evrime ne ölçüde, ciddi boyutlardaki gen füzyonuna ne ölçüde vurgu yapılacağı sorusudur. Bir başka deyişle, ökaryot hücrenin kaç tane özelliği ev sahibi bir hücrenin tedrici evrimiyle evrilmiş, kaç tanesi *ancak ve ancak* bir gen füzyonundan sonra gelişebilmiştir? Yıllar boyunca, ökaryot hücrenin kökenine ilişkin, saf hayal gücüne, hatta uydurmacalara dayalı kuramlardan tutun biyokimyanın titizlikle yeniden kurulmasına dayalı kuramlara kadar, çok sayıda kuram ileri sürülmüştür. Henüz bunların hiçbirisi kanıtlanmamıştır. Bu kuramların hepsi iki büyük gruba ayrılabilir: Grupların biri ağır ağır gelişen Darwinci farklılaşmayı, biri dramatik gen füzyonunu savunur. Bu gruplar biyoloji alanındaki eski bir mücadelenin taraflarına tekabül eder: Bu mücadelenin bir tarafında evrimin tedrici, sürekli değişikliklerle ilerlediğini savunanlar, öbür tarafında da muazzam durgunluk ya da denge dönemlerinin, zaman zaman ani ve dramatik değişikliklerle kesintiye uğradığında ısrar edenler vardır. Eski bir espride dendiği gibi, bir tarafta kimeralar sayesinde evrim, öbür tarafta pislikler sayesinde evrim.⁵

Ökaryot hücre bağlamında, Christian de Duve, bu iki gruba "ilkel fagosit" ve "talihli bir karşılaşma" hipotezleri olarak niteler. İlkel fagosit fikri kavramsal olarak Darwincidir ve Ox-

fordlu evrimci Tom Cavalier-Smith ile bizzat de Duve tarafından çok inandırıcı bir biçimde savunulmaktadır. Fikrin özü, ökaryot hücrenin atasının modern ökaryot hücrenin bütün özelliklerini tedricen edindiğini söyler: çekirdek, cinsiyet, hücre iskeleti ve en önemlisi fagositoz, yani şekil değiştirerek, yutarak, içerde sindirerek başka hücreleri yutma becerisi dahil bütün özellikleri. Bu ilkel fagositin modern ökaryotlara kıyasla yoksun olduğu tek özellik, oksijen kullanarak enerji üreten mitokondrilerdir. Bu ilkel fagosit enerji için, çok daha az etkili bir süreç olan fermentasyona dayanıyordu muhtemelen.

Ama bir fagosit için, mitokondrilerin atasını yutmak sadece bir günlük iyi bir iştir, bundan daha kolay ne olabilir ki? Gerçekten de bir hücre başka bir hücrenin içine başka nasıl girebilir? Hiç kuşku yok ki mitokondrilere sahip olmak ilkel fagositte önemli bir avantaj kazandırıyordu, mitokondriler fagositin enerji üretiminde bir devrim yaratabilirdi, ama yapısını temelden değiştirmiyorlardı. Fagosit, mitokondrileri yutmadan önce fagositti, sonra da fagosit olarak kalmıştı, ama daha fazla enerjiye sahipti. Ama esir alınan mitokondrilerden birçok gen, ev sahibi hücrenin çekirdeğine aktarılmış ve genomuna dahil edilmiş olsa gerekti, modern ökaryot hücrenin kimerik niteliğini açıklayan da işte bu aktarımdır. Mitokondrilerden alınan genler, mirasları itibarıyla bakteriyeldir. Bu yüzden de ilkel fagositi savunanlar modern ökaryotların kimerik niteliklerine karşı çıkmazlar, ama ev sahibi hücre olarak kimerik olmayan bir fagositin (güvenilir, ama ilkel bir ökaryot) varlığını ileri sürerler.

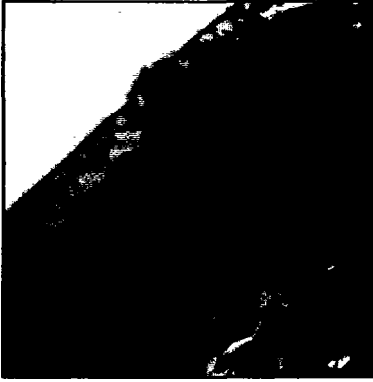
1980'lerin başında Tom Cavalier-Smith, mitokondrileri olmayan, ilkel görünümlü tek hücreli ökaryotların bini aşkın türünü ortaya çıkarmıştı. Belki de bunların birkaçının ökaryot hücrenin ilk günlerinden bugüne ulaştığını, hiçbir zaman mitokondrisi olmamış ilkel fagositin soyundan doğrudan gelmiş olabileceklerini söylüyordu. Eğer böyleyse, genetik bu ökaryotların hiçbir kimera emaresi göstermemeleri, tümüyle Darwinci süreçlerle evrilmiş olmaları gerekiyordu. Ama sonraki yirmi yıl içinde, bu türlerin hepsinin de kimerik oldukları ortaya çıktı: Öyle görü-

nüyordu ki hepsinin de bir zamanlar mitokondrisi olmuş, sonra bunları kaybetmişler, başka bir şeye dönüşmüşlerdi. Bilinen bütün ökaryot hücreler ya bugün mitokondriye sahiptir ya da geçmişte sahip olmuştur. Mitokondrisi olmayan ilkel bir fagosit var olmuştusa, doğrudan soyundan gelen bir şey bırakmamıştır. Bunu söylemek, böyle bir şeyin hiç olmadığı anlamına gelmez, sadece varlığının dönemsel olduğunu söylemek anlamına gelir.

İkinci kuramlar grubu, "talihli karşılaşma" bayrağı altında toplanır. Bu kuramların hepsi iki ya da daha fazla prokaryot hücre arasında bir tür ilişki olduğunu, bu hücrelerin sonunda yakından ilişkili bir hücreler topluluğu, bir ucube oluşturduğunu varsayar. Ev sahibi hücre bir fagosit değil de hücre duvarı olan bir arkeonsa, en büyük sorun başka hücrelerin bu arkeonun içine nasıl olup da girdiği sorusudur. Bu fikrin başlıca kahramanları, en başta da Lynn Margulis ve Bill Martin (birinci bölümde tanışmıştık) çeşitli olasılıkları işaret eder. Örneğin, Margulis yırtıcı bir bakterinin başka bakterilerin içine zorla girdiğini ileri sürer (bunun örnekleri vardır). Martinse onun aksine hücreler arasında karşılıklı bir metabolik ilişki olduğu görüşündedir, taraflardan her birinin diğeriyle hammadde değiş tokuş ettiği bu tür ilişkileri ayrıntılı olarak incelemektedir.⁶ Bu durumda, bir prokaryotun fagositoz yardımı olmaksızın bir diğerrinin içine fiziksel olarak nasıl girebileceğini görmek zordur, ama Martin bunun bakterilerde kesin olarak gerçekleştiğini gösteren iki örnek sunar (Şekil 4.5).

Talihli karşılaşma kuramları esasen Darwinci değildir, çünkü evrimin gerçekleşme tarzının küçük değişikliklere değil, tümüyle yepyeni bir oluşumun nispeten dramatik kökenine dayandığını varsayarlar. Kritik önemde bir nokta şudur: Bütün ökaryot özelliklerinin ancak ve ancak bu talihli birleşmeden sonra evrildiği varsayılır; birleşen hücreler kesinlikle prokaryottur, fagositoz, cinsiyet, dinamik hücre iskeleti, çekirdek vs.'den yoksundur. Bu özellikler ancak hücreler arasındaki birleşme sağlamlaştıktan sonra gelişmiştir.

Bunun anlamı şudur: Bu birleşmede öyle bir şey olmuştur ki sıkı sıkıya muhafazakar, değişmek nedir bilmeyen prokaryotu



Şekil: 4.5 Başka bakteri hücrelerinde yaşayan bakteri hücreleri. Çok sayıda gamma-proteobakterisi (açık renk alacalı griler) beta-proteobakteriler (koyu gri) içinde yaşar; bunların hepsi de ökaryot bir hücrenin içinde yer alır, hücrenin alacalı çekirdeği resmin alt orta kısmında görülebilir.

tam zıddına, hız meraklısı, değişip duran ökaryota çevirmiştir.

Bu olasılıklar arasında nasıl bir ayrım yapacağız? Ökaryot imza genlerinin böyle bir ayrım yapamadığını gördük, bu genlerin dört milyar yılda mı yoksa iki milyar yılda mı evrildiklerini, mitokondrilerle füzyona girmeden önce mi yoksa sonra mı evrildiklerini bilmemiz mümkün değildir. Prokaryotlarda denkleri olan ve ağır ağır evrilen genlere bile güvenemeyiz, hangisini seçeceğimize bağlı olarak cevap değişir. Örneğin, Woese'nin ribozomal RNA ağacını değerlendirirsek, veriler ilkel fagosit modeline uygunluk gösterir. Bunun sebebi şudur: Woese'nin ağacında ökaryotlar ve arkea ortak bir atayı paylaşan "kardeş" gruplardır, "anne"leri aynıdır. Bu da ökaryotların arkeadan evrilmediği anlamına gelir, kardeş kardeşi doğurmaz çünkü. Bu durumda ortak atalarının prokaryot olduğu neredeyse kesindir (aksi takdirde bütün arkeanın çekirdeklerini kaybetmesi gerekirdi), bunun ötesinde hiç kuşkusuz söyleyecek fazla şeyimiz yoktur. Ökaryot soyunun mitokondrileri yutmadan önce ilkel bir fagosite evrilmiş olması mümkündür, ama bu olaya dair genetik bir kanıttan iz bile yoktur.

Tersine, çok sayıda gen kullanarak daha karmaşık gen ağaçları inşa edersek, ökaryotlar ile arkea arasındaki kardeşlik bağı bozulmaya başlar; arkea ökaryotları doğurmuş gibi görünmeye başlar. Hangi arkeon olduğu belli değildir, ama şimdiye kadar yapılmış en geniş kapsamlı araştırma (5700 genden bir süpe-

rağacın çıkarıldığı, daha önce bahsettiğim araştırma) ev sahibi hücrenin gerçek bir arkeon olduğunu, modern termoplazmayla çok yakından ilişkili olduğunu ortaya koymaktadır. Bu farklılık kesinlikle kritik önemdedir. Ev sahibi hücre gerçek bir arkeonsa (tanım itibarıyla çekirdeği, cinsiyeti, dinamik bir hücre çekirdeği olmayan, fagositoz yapamayan vs.) ilkel bir fagosit olmadığı açıktır. Eğer durum böyleyse, “talihli karşılaşma” hipotezinin doğru olması gerekir: Ökaryot hücre prokaryot hücreler arasındaki bir birleşmeden doğmuştur. İlkel bir fagosit hiç olmamıştır; ilkel bir fagositin varlığına dair bir kanıtın olmaması, bir parende atarak yokluğunun kanıtına dönüşüverir.

Ne var ki bunun da nihai cevap olması pek muhtemel değildir. Çok fazla şey kesin olarak hangi genlerin ya da türlerin seçildiğine ve seçim kriterine dayanmaktadır. Bunlarda ne zaman bir farklılık olsa, ağaç farklı bir dallanma örüntüsü gösterir; istatistiksel varsayımlar, prokaryotlar arasındaki yatay transferler ve bilinmeyen değişkenler bu örüntüde karışıklığa yol açar. Durumun daha fazla veriyle çözülebilir bir soru mu, yoksa genetiğin cevaplayamayacağı bir soru mu (daha yakından baktığımızda her şeyin daha karmaşık bir hal aldığı belirsizlik ilkesinin biyolojideki eşdeğeri mi) olduğunu gerçekten kimse bilmiyor. Peki bu soruya genetik verilerle çözüm bulunamazsa, çatışmacı mizaçtaki rakip bilim insanı cepheleri arasında daimi bir çamur atma yarışına mı mahkum olacağız? Başka bir yolu daha olmalı.



Bilinen bütün ökaryot hücrelerin ya şimdi mitokondrileri vardır ya da geçmişte bir zamanlar mitokondrileri olmuştur. En ilginç de hâlâ mitokondri işlevi gören (yani oksijen kullanarak enerji üreten) mitokondrilerin hepsi de serbest yaşayan bakteri oldukları geçmiş hayatlarının bir kalıntısını, bir avuç geni hâlâ korur. Bu küçük mitokondri genomları, öyle sanıyorum ki ökaryot hücrenin en derin sırrını saklamaktadır.

Ökaryotlar iki milyar yılın epeyce büyük bir bölümü süresince farklılaşmışlardır, bu süre zarfında da birbirlerinden bağımsız

olarak mitokondri genlerini kaybetmişlerdir. Hepsi mitokondri genlerinin yüzde 96 ila 99,9'unu kaybetmiş, muhtemelen bu genlerin büyük bir çoğunluğunu hücre çekirdeğine aktarmıştır; ama hiçbirisi de mitokondri genlerinin tamamından, oksijen kullanma yetisini de kaybetmeksizin yoksun kalmamıştır. Bu tesadüfi bir olaymış gibi gelmiyor kulağa. Bütün mitokondri genlerinin çekirdeğe aktarılması akılcı ve düzenlidir. Genlerin yüzde 99,9'u çekirdekte tek bir kopya halinde, yedekli olarak depolanıyorsa neden her hücrede yüzlerce gen karakolu korunsun ki? Mitokondride gen bulundurmak, genleri okumak ve etkin proteinlere çevirmek için gerekli aygıtın tamamının da tek tek her mitokondride bulundurulması gerektiği anlamına gelir. Böyle bir israf muhasebecilerin canını sıkar, doğal seçim muhasebecilerin koruyucu azizidir ya da öyle olsa gerektir.

Evet, olay hız kazanıyor. Mitokondriler gen depolamaya uygun olmayan saçma yerlerdir. Mitokondrilere genellikle, hücrelerin enerji santrali yakıştırması yapılır, ama arada kurulan paralellik hayli doğrudur. Mitokondri zarları, bir milimetrenin birkaç milyonda biri kadar bir alan üzerinde, bir şimşekle aynı voltajda (ev içindeki donanımdan bin kat daha güçlü) elektrik yükü üretir. Genleri burada depolamanın, British Library'nin en değerli kitaplarını tehlikeli bir nükleer santralde koruma altına almasından farkı yoktur. Ve bu öyle sadece kuramsal bir tehlike değildir. Mitokondri genleri, çekirdekteki genlerden çok daha hızlı mutasyona uğrar, örneğin elverişli bir deneysel model olan mayada 10.000 kat daha hızlı mutasyon geçirirler. Fakat buna rağmen, iki genomun (çekirdek ve mitokondri genomunun) birlikte uygun bir biçimde işlemesi kritik önemdedir. Ökaryot hücrelerin enerjisini veren yüksek voltajlı kuvvet, her iki genomda şifrelenen proteinler tarafından üretilir. Birlikte iyi işleyemezlerse bunun cezası ölümdür: hücrenin ve bireyin ölümü. Bu yüzden iki genomun elektrik üretmek için birlikte çalışması gerekir. İşbirliği yapmaktaki herhangi bir başarısızlık ölümle sonuçlanır, gelgelelim mitokondri genleri çekirdek genlerinin 10.000 katı kadar hızlı mutasyon geçirir, bu da böyle sıkı bir işbirliğini ne-

redeyse imkansız hale getirir. Ökaryot hücrelerin en özgün yönünün bu olduğuna hiç kuşku yoktur. Ders kitaplarında olduğu gibi, bunu sırf bir tuhaflık olarak niteleyip bir kenara bırakmak, burnumuzun ucunda duran bir ipucunu elden kaçırmakla biridir. Bütün mitokondri genlerinden kurtulmanın bir yararı olsaydı, doğal seçilim şimdiye kadar, en azından tek bir türde bunu yapardı. Hiç kuşku yok ki korunmalarının bir sebebi vardır.

Peki o halde neden bir mitokondri genomu korunsun? Serbest bir düşünür olan, fotosentez hakkındaki fikirlerini üçüncü bölümde tartışmış olduğumuz John Allen'a göre bunun cevabı sadece solunumun kontrol edilmesinden ibarettir. Başka hiçbir gerekçe yeterince büyük değildir. Solunum farklı insanlara farklı şeyler ifade eder. Çoğumuz için sadece nefes almak anlamına gelir. Ama biyokimyagerlere göre, solunum hücresel düzeydeki nefes almayı, besinin oksijenle tepkimeye girip şimşek gücünde bir iç voltaj üretmesi sürecindeki bir dizi minik adımı ifade eder. Nefes almaktan daha büyük bir aciliyet taşıyan bir seçilim baskısı düşünemiyorum; aşağıda hücre düzeyinde de aynı şey geçerlidir. Örneğin, siyanür hücrelerin solumasını engeller ve hücrenin işleyişini, başa geçirilen bir naylon torbadan daha hızlı sonlandırır. Solunum normal bir biçimde işliyorken bile, "düğmelerle oynanarak" enerjinin talebe göre düzenlenmesi sürekli incelelikle ayarlanır. Allen'ın düşüncesinde kritik önemdeki nokta şudur: Enerjinin bu şekilde talebe uydurulması, sürekli bir geri bildirim gerektirir, bu da ancak gen faaliyetinin yerel kontrolüyle sağlanabilir. Tıpkı bir ordunun savaş alanındaki taktik yerleşiminin uzaktaki merkezî hükümet tarafından kontrol edilememesi gibi, çekirdek de bir hücrenin içindeki yüzlerce mitokondriyi kontrol edebilecek durumda değildir. O halde mitokondri, solumayı düzenleyip enerjiyi talebe uyduracak küçük bir genomu korur.

Allen'ın fikirleri hiçbir şekilde kanıtlanmamıştır, gerçi bu fikirleri destekleyen kanıtlar çoğalmaktadır. Allen haklıysa eğer, bu durumun diğer anlamları ökaryot hücrenin evriminin açıklanmasını sağlayabilir. Ökaryot hücrelerde solunumun kontrol edilmesi için birçok gen karakoluna ihtiyaç varsa, büyük karma-

şık bir hücrenin bunlar olmaksızın solunumu kontrol edememesi mantığa uyar. Şimdi bir de bakteriler ile arkeanın karşı karşıya olduğu seçim baskılarını düşünelim. Her ikisi de ATP'yi mitokondrilere benzer şekilde, bir zar üzerinde bir elektrik yükü yaratarak üretir. Ne var ki prokaryotlar dış hücre zarını kullanırlar ve bu da onlara büyük bir sorun çıkarır. Aslına bakarsanız, dış çeperleri üzerinden nefes alırlar. Bunun neden bir sorun olduğunu anlamak için, patates soymayı düşünelim. Bir ton patates soymanız gerekiyorsa, sadece en büyük patatesleri seçmeniz gerekir; böylece kabuğa nazaran daha fazla patates elde etmiş olursunuz. Tersine, küçük patatesleri soyarsanız, patatese kıyasla daha fazla kabuk elde edersiniz. Bakteriler derileriyle nefes alan patatesler gibidir, ne kadar büyürlerse o kadar az nefes alabilirler.⁷

İlkel olarak, bakteriler solunum güçlüklerini, enerji üreten zarları içselleştirerek çözmeye çalışabilir, daha önce de belirttiğimiz üzere, pratikte bu bir ölçüde gerçekleşir: Bazı bakterilerin onlara “ökaryot” görünümünü veren iç zarları vardır. Ama bu hiç bir zaman çok ileri gitmemiştir, “ortalama” bir ökaryot hücrenin enerji üretimine ayrılmış iç zarlarının sayısı en enerjik bakteride olduğundan yüzlerce kat fazladır. Başka birçok özellikte söz konusu olduğu gibi, bakteriler ökaryot özellikler yelpazesinde tırmanmaya başlamışlar, ama sonra durmuşlardır. Neden peki? Sanırım bunun sebebi daha geniş bir iç zar alanında solunumu kontrol edememeleridir: Bunu yapabilmek için, mitokondrilere olduğu gibi, çok sayıda gen kümesini kendilerinden ayırmaları gerekecekti ve bunu başarmak da o kadar kolay değildi. Bakteriler üzerindeki bütün seçim baskıları (küçük bir genom dışında her şeyden vazgeçerek çabuca kopyalanmak) büyük karmaşık bakteriler aleyhine işliyordu.

Fakat fagositozun talep ettiği şey tam da budur. Öncelikle fagositlerin başka hücreleri yutabilecek kadar büyük olmaları gerekir, ama bakteriler büyürken daha az verimli bir hal alıyorlardı. Sonra fagositlerin hareket etmek, fiziksel olarak şekil değiştirmek ve avlarını yutmak için bol bol enerjiye ihtiyacı vardır; ama bakteriler daha büyüdükçe daha az enerjik olurlar, hareket

edip şekil değiştirmeye enerji harcama becerileri azalır. Bana öyle geliyor ki hızlı kopyalanmaya ayarlanmış minicik bir bakteri, enerji sıkıntısı çeken büyük bir hücreye, büyük hücrenin bir fagositin çok yönlü özelliklerinin hepsini geliştirmeyi başarmasına fırsat kalmadan, her seferinde baskın çıkardı.

Ama "talihli karşılaşma" hipotezinde durum farklıdır. Burada iki prokaryot metabolik bir uyum içinde bir arada yaşar, birbirlerine bir hizmet sunar. Bu nitelikteki simbiyotik ilişkiler prokaryotlar arasında yaygındır, hem de istisnadan çok kural olma noktasında. Son derece ender rastlanan şey (yine de prokaryotlarda görüldüğü belgelenmiş bir şey) bir ortağın diğerini fiziksel olarak yutmasıdır. Yutulma gerçekleştiğinde, hücrenin tamamı, içselleştirdiği bakteri de dahil olmak üzere tek bir varlık olarak evrilir. Her biri diğerine hizmet sunmayı sürdürse de, ihtiyaç fazlası özellikler yavaş yavaş silinir, yutulmuş bakteri sonunda ev sahibi hücre için sadece birkaç iş yapar hale gelir; mitokondri haline gelmiş bakterilerde bu iş enerji üretimidir.

Mitokondrilerin sunduğu muazzam avantaj (aslında mitokondrilerin ökaryot hücrenin evrimini mümkün kılmasının sebebi) iç enerji zarlarından oluşan hazır bir sistem, ayrıca solunumu yerel olarak kontrol etmek için gerekli gen karakollarını sunmalarıdır. Konak hücre ancak mitokondrilere sahipse sakatlayıcı enerjik bir bedel ödemeksizin büyük, faal bir fagosit haline gelebilir. Bunların hepsi doğruysa, mitokondrisi olmayan ilkel bir fagosit hiç olmamıştır, çünkü mitokondriler yoksa fagositoz mümkün olmaz.⁸ Ökaryot hücre iki prokaryot hücrenin birleşmesiyle oluşmuştu. Sınırlamalar hafiflediğinde, yeni bir hayat tarzı, fagositoz ilk kez mümkün hale geldi. Ökaryot hücre sadece bir kez evrilmiştir, çünkü iki prokaryotun birleşmesi, bir prokaryotun diğerinin içine girmesi gerçekten nadir rastlanan bir olay, sahiden talihli bir karşılaşmadır. Hayatta değerli bulduğumuz her şey, dünyamızın bütün harikaları hem şansın hem zorunluluğun somutlaştığı tek bir olaydan kaynaklanır.



Bu bölümün başında ökaryot hücrenin kökenini ancak, belirleyici özelliğinin, çekirdeğin önemini kavradığımızda anlayabileceğimizi, açıklayabileceğimizi söylemiştim; o yüzden de bu bölümü bitirirken çekirdeğe dönmemiz gerekiyor.

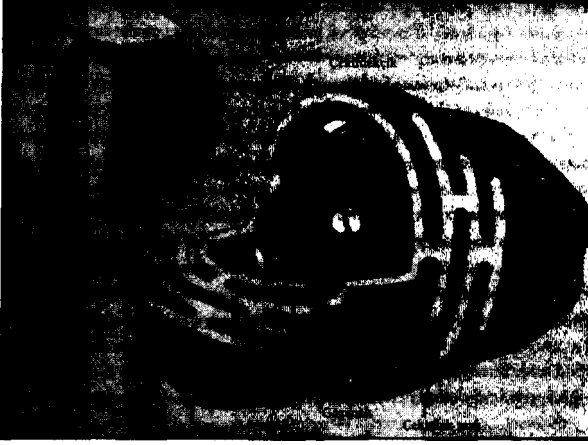
Ökaryot hücrenin kendisi gibi çekirdeğinin kökeni de hücre zarlarının basit baloncuklarından koca koca hücrelerin yutulmasına kadar bir fikirler ve kuramlar kıyımına konu olmuştur. Bu fikirlerin çoğu ilk engelde tökezleyip yere serilmiştir. Örneğin, bu kuramların birçoğu, hücre dış zarları gibi süreklilik gösteren bir örtüsü olmayan, aksine hücrenin içindeki başka iç zarlarla süreklilik taşıyan, geniş gözeneklerle dolu yassılaştırmış bir dizi kesecikten oluşan çekirdek zarının yapısını açıklayamaz (Şekil 4.6). Bazı varsayımlar, bir hücrenin çekirdeği olmasının, olmasından neden daha iyi olduğunu açıklayabilecek bir gerekçe sunamaz. Bu soruya verilen çekirdek zarının genleri “koruduğu” yolundaki standart cevaba, “Neye karşı korur?” sorusunu yöneltmek gerekir. Neye karşı? Hırsızlığa karşı mı? Vandallığa karşı mı? Peki, örneğin moleküler hasarı önlemek gibi, bir çekirdeğin varlığını kayıran evrensel seçim avantajları varsa, bakterilerde neden çekirdek gelişmemiştir? Daha önce gördüğümüz gibi, bazı bakterilerde bu ihtiyaca cevap verebilecek iç zarlar vardır.

Pek az sağlam kanıtla karşı karşıyayız, bu durumda ikinci bölümde tanıştığımız dahi ikilinin, Bill Martin ve Eugene Koonin’in muhteşem bir hayal gücüne dayalı varsayımından bahsetmek istiyorum. Martin ve Koonin’in geliştirdiği bu fikrin iki büyük meziyeti bulunuyor. Bir hücre çekirdeğinin neden özellikle kimerik bir hücrede, en önemlisi de yarı arke yarı bakteri olan bir hücrede (daha önce gördüğümüz gibi, ökaryot hücrenin en inandırıcı kökeninde) evrilmesi gerektiğini açıklıyor. Bir de neredeyse bütün ökaryot hücre çekirdeklerinin, bakterilerde olanın tam tersine, hiçbir şeyi şifrelemeyen DNA’yla dolu olduğunu açıklıyor. Bu fikir yanlış bile olsa, aramızda gereken şeyin böyle bir şey olduğu kanısındayım. Yanlış bir fikir bile olsa, ilk ökaryotların karşı karşıya kaldığı, bir şekilde çözülmüş olması gereken gerçek bir sorunu gündeme getiriyor. Bilime büyü katan cinsten bir fikir bu, umarım doğrudur.

Martin ve Koonin, ökaryot genlerinde gözlenen “parçalı gen” yapısını, yirminci yüzyıl biyolojisinin en büyük sürprizlerinden biri olan keşfi değerlendiriyorlardı. Ökaryot hücre, genleri, bakteri genlerinde olduğu gibi düzenli bir biçimde sıralanmak yerine, aralarında hiçbir şey şifrelemeyen dizilerin bulunduğu parçalara ayrılmıştır. Hiçbir şey şifrelemeyen dizilimler intron olarak bilinir (“intragenic region”un [gen arası bölge] kısaltmasıdır). Bunların uzun zamandır kafa karıştıran evrimsel tarihi de ancak yeni yeni gün ışığına çıkmaya başlamıştır.

Intronlar arasında birçok farklılık vardır, ama artık biliyoruz ki intronların ortak bazı ayrıntıları, ortak atalarının, kendisini çılgınca kopyalayarak bir genomu bozma yetisine sahip *sıçrayan bir gen*, sırf kendisini düşünen bencil bir gen olduğunu gösteriyor. Sıçrayan genin numarası hayli basittir. Sıçrayan bir gen, okunup genellikle daha uzun bir dizilimin bir parçası olarak RNA'ya girdiğinde, kendiliğinden bir RNA makası şeklini alır ve kendisini uzun dizilimden ayırır. Sonra da kendisini yeniden, tekrar tekrar DNA olarak üretecek bir şablon olarak işler. Bu yeni DNA, aşağı yukarı rastgele bir biçimde, bencil orijinalin sadık kopyaları halinde genoma dahil edilir. Birçok sıçrayan gen tipi vardır, bir tema üzerine dahiyane çeşitlemelerdir. Sıçrayan genlerin hayret verici evrimsel başarısına, insan genomu projesinde ve başka büyük genom dizilimi çözme çalışmalarında tanık olunmuştur. İnsan genomunun neredeyse yarısı, sıçrayan genlerden ya da onların çürümüş (mutasyona uğramış) kalıntılarından oluşur. Ortalama olarak bakıldığında, bütün insan genlerinin içinde, ölü ya da diri üç tane bencil gen vardır.

“Ölü” bir sıçrayan gen (artık sıçrayamayacak kadar çürümüş bir sıçrayan gen) “canlı” bir sıçrayan genden daha beterdur. “Canlı” bir sıçrayan gen en azından herhangi bir hasara yol açmaksızın kendisini RNA'dan koparır; ölü bir gense orada durur ve yolu kapatır. Gen kendisini kesemiyorsa, konak hücrenin bu durumla uğraşması gerekir, aksi takdirde bu gen proteine girecek ve felakete sebep olacaktır. Ökaryot hücreler, istenmeyen RNA'yı kesip atmanın bir yolunu evrimlerinin ilk dönemlerinde



Şekil: 4.6 Hücredeki diğer zarlarla (özellikle de endoplazmik retikülüm ile) süreklilik gösteren hücre çekirdeği zarının yapısı. Hücre çekirdeği zarı, birleşen bu keseciklerden oluşur. Hiçbir hücrenin dış zarıyla yapısal olarak benzerlik yoktur, dolayısıyla çekirdek bir başka hücrenin içinde yaşayan bir hücreden türememiştir.

geliştirmişlerdir. İlginçtir, sıçrayan bir genden RNA makasını almış, bunu proteinlerle paketlemişlerdir. Bitkilerden mantarlara ve hayvanlara, bütün yaşayan ökaryotlar hiçbir şey şifrelemeyen RNA'dan kurtulmak için bu antik makasları kullanır. O halde tuhaf bir durumla karşı karşıyayız; ökaryot genomları, sıçrayan bencil genlerden alınmış intronlarla süslüdür. Bunlar, ne zaman bir gen okunsa, sıçrayan genlerden alınmış RNA makaslarıyla RNA'dan kesilip ayrılıyor. Sorun (ve bütün bunların hücre çekirdeğinin kökeniyle ilgili olmasının sebebi) şu: Bu antik makaslar biraz yavaş keser.

Genel olarak bakıldığında, prokaryotlar sıçrayan genleri de intronları da tolere edemezler. Prokaryotlarda, genlerin kendileriyle yeni protein yapma aygıtı arasında bir ayrılık yoktur. Bir hücre çekirdeğinin yokluğunda, protein yapma makineleri (ribozomlar) DNA'yla karışır. Genler bir RNA şablonuna okunur okunmaz proteine çevrilir. Sorun şudur ki ribozomlarda protein yapımı son derece hızlıdır, intronları bertaraf eden RNA makaslarıysa yavaştır. Makaslar bir intronu kesinceye kadar, bakteri proteinin intronu içeren işlevsiz kopyasından birkaç tane üretmiş

olacaktır. Bakterilerin sıçrayan genlerden ve intronlardan nasıl kurtuldukları tam olarak bilinmiyor (geniş nüfuslarda seçilimi arındırmak bunu başarabilir) ama gerçek şudur ki bunu yaparlar. Bakterilerin çoğu, sıçrayan genlerin ve intronların neredeyse tamamını bertaraf etmiştir, gerçi mitokondrilerin ataları da dahil olmak üzere bazılarında birkaç tane kalmıştır. Bu gibi bakterilerde, bunların genom başına yaklaşık 30 kopyası bulunur, oysa ökaryot bir genomda binlerce ya da milyonlarca kopya vardır.

Ökaryotların kimerik ataları belli ki, mitokondrilerinden gelen bir sıçrayan gen istilasına maruz kalmıştır. Böyle olduğunu biliyoruz, çünkü birbirlerine benziyorlar; ökaryotlardaki sıçrayan genler yapıları itibarıyla bakterilerde bulduğumuz pek az sıçrayan gene benzer. Üstelik, yaşayan ökaryotlardaki intronların çoğunun, amipten devedikenine, sinekten mantara, insana varıncaya kadar ökaryotların genlerinde tam olarak aynı yerde bulunduğu tespit edilmiştir. Muhtemelen erken bir tarihte, bütün ökaryotların ortak bir atasına sıçrayan genler bulaşmış, kendilerini genoma kopyalamış, nihayetinde “ölmüş” ve çürüyerek sabit intronlar haline gelmişlerdir. Peki ama sıçrayan genler neden ilk ökaryot hücrelerde böyle bir ölüm koşusuna çıkmıştır? Bunun sebeplerinden biri, bakterilerdeki sıçrayan genlerin konak hücrenin (bir arkeon) kromozomunda oradan oraya sıçırıyor olmaları, konak hücrenin de onlarla nasıl başa çıkacağına dair hiçbir fikrinin olmamasıydı. Başka bir sebep de şudur: Kimerik hücrelerin ilk baştaki nüfusu küçük olsa gerekti, bu yüzden de geniş bir bakteri nüfusundaki kusurları bertaraf eden türden, arındırıcı bir seçim geçerli olmamış olabilir.

Sebebi ne olursa olsun, ilk ökaryotlar ilginç bir sorunla karşılaşıyorlardı. Intronlarla doluydular, RNA makasları yeterince hızlı kesmediğinden, bu intronların birçoğu proteinlere dahil edilmiş olabilirdi. Böyle bir durum, hücreleri mutlaka öldürmese de (işlevsiz proteinler parçalanır, yavaş makaslar nihayetinde işlerini tamamlar ve işlevsel proteinler üretilir) gerçekten berbat bir kargaşa yaratmış olsa gerektir. Ama bu çamursu hücrelerden bize doğru bakan bir çözüm vardır. Martin ve Koonin'e göre,

düzeni sağlamanın (her zaman uygun işlevsel proteinler üretmenin) kolay yolu, ribozomlar protein yapımına başlamadan önce makaslara kesim işlemini tamamlamak için yeterince zaman tanınmasıydı. Başka bir deyişle, RNA'nın intronlarıyla birlikte önce makaslara gitmesini, sonra ribozomlara geçirilmesini sağlamaktı. Zaman içinde böyle bir ayrılık ancak mekan içinde bir ayrılmayla, ribozomların DNA'nın yakınından ayrılmasıyla sağlanabilirdi. Peki ama neyle? Üzerinde geniş gözenekler olan bir zarla! Mevcut bir zarı alırsın, içine genlerini doldurursun, RNA'yı ribozomlara göndermeye yetecek kadar gözenegi olmasına dikkat edersin, her şey yoluna girer. Bütün ökaryotların belirleyici özelliği olan hücre çekirdeği, Martin ve Koonin'e göre genleri korumak için değil, onları sitoplazmadaki protein yapım fabrikalarından uzak tutmak için evrilmiştir.

Bu çözüm kulağa biraz kaba ve kolaycı geliyor olabilir (gerçi, evrimin işleme biçimi dikkate alındığında bu önemli bir degerdir), ama bazı yararlar sunmaktadır. Sıçrayan genler artık bir tehdit oluşturmaktan çıktığında, intronlar bir ganimet haline gelmiştir. Bunun sebeplerinden biri, genlerin farklı ve yeni biçimlerde dizilmelerini, bir olası proteinler "mozaigi", yani bugün ökaryot genlerinin büyük bir özelliği olan şeyi yaratmalarını sağlamış olmalarıdır. Bir tek gen beş farklı şifreleme bölgesinden oluşuyorsa, intronlar farklı biçimlerde kesilebilir; aynı gen-den ilgili bir proteinler yelpazesi çıkarılabilir. İnsan genomunda sadece yaklaşık 25.000 gen varken, bunlar karıştırılıp en az 60.000, hatta belki daha fazla protein elde edilir; bir çeşitlilik zenginliği söz konusudur. Bakteriler muhafazakarlığın zirvesindeyse, intronlar da ökaryotları yorulmak nedir bilmeyen deneycilere çevirmiştir.

İkinci bir ganimetse sıçrayan genlerin ökaryotların genomlarını büyütmesini sağlamış olmasıdır. Ökaryotlar fagosit hayat tarzını benimsediklerinde artık, bakteriyel hayatın sonu gelmez angaryasına, özellikle de kendilerini hızlı kopyalamaya uyarlatma ihtiyacına bağlı olmaktan çıkmışlardı. Ökaryotların bakterilerle rekabet etmeleri gerekmiyordu, onları yiyebiliyor, rahat

rahat sindirebiliyorlardı. Hız ihtiyacından kurtulmuş olan bu ilk ökaryotlar DNA ve gen biriktirebiliyorlardı, bu da onlara çok daha büyük bir karmaşıklığa gitme imkanı sağlıyordu. Sıçrayan genler, ökaryot genomlarının, normal bakteri genomu boyutlarının bin katı büyüklüğe ulaşmasını sağlıyordu. Fazladan DNA'nın çok büyük bir bölümü çöp olmaktan öteye geçmese de, bazıları yeni genler ve düzenleyici dizilimler oluşturmaya yatkındı. Bunun neredeyse bir yan etkisi olarak da daha büyük bir karmaşıklık ortaya çıkıyordu.

Dünya üzerindeki karmaşık hayatın ya da insan bilincinin kaçınılmazlığından bu kadar bahsetmek yeter. Dünya ikiye ayrılmıştır: Ebedi prokaryotlar ile kaleydoskopik ökaryotlar. Birinden diğerine tedrici bir evrim olmuş gibi görünmemektedir, sınırsız karmaşıklığa doğru prokaryot popülasyonlarının en son olasılıkları, düşünülebilecek bütün varyasyonları araştırdığı yavaş bir tırmanma süreci olmamıştır. Hiç kuşkusuz ki geniş bakteri popülasyonları bütün olası yolları araştırmıştır, ama sonsuza kadar bakteri olarak kalmışlardır, büyüklüklerinin ve enerjilerinin aynı anda artması becerisinden yoksun olmaları onları engellemiştir. Ancak ender rastlanan tesadüfi bir olay, iki prokaryot arasındaki bir işbirliği, birinin bir şekilde diğerinin içine girmesi bu çıkmaza son vermiştir. Bir kaza. Yeni kimerik hücre bir dizi sorunla karşı karşıyaydı, ama büyük bir özgürlüğü vardı: enerjisini düşürecek bir cezaya uğramaksızın büyüklüğünü artırma özgürlüğü, bir fagosit olup bakteriyel döngüyü kırma özgürlüğü. Bencil genlerin patlamasıyla karşı karşıya kalan bu tesadüfi çözüm sadece hücre çekirdeğinin doğmasına değil, DNA toplama ve bunu çevremizdeki büyümlü dünyanın sonu gelmez topluluklarında yeniden birleştirme eğilimine de yol açmış olabilir. İşte bir başka kaza. Öyle görünüyor ki bu harikalar dünyası bu iki derin kazadan doğmuştur. Kader böyle hassas ipliklere asılı olmuştur. Burada olduğumuz için şanslıyız aslına bakarsınız.

SEKS

Dünya Üzerindeki En Büyük İkramiye

İrlandalı oyun yazarı George Bernard Shaw'un hayaleti, anekdotlar ve doğruluğu kuşkuyla kimi anlatılar için güçlü bir miknatıstır. Böyle bir hikayede, Shaw'un bir partide güzel bir yıldızın teklifiyle karşı karşıya kaldığı anlatılır.¹ "Bir çocuk yapmalıyız," der yıldız, "benim güzelliğim, sizin de zekanızla donanır". Ah, der tedbirli Shaw, "Peki ya benim güzelliğimi, sizin zekanızı alırsa?"

Shaw'un hakkı vardı: Seks, bilinen başarılı genleri rastgeleleştiren en tuhaf süreçtir. Herhalde ancak seksin rastgeleleştirme gücü bir Shaw ya da güzel bir yıldız ortaya çıkarabilir, gelgelelim seks başarılı bir gen bileşimi ortaya çıkarır çıkarmaz bu bileşimi yeniden çözer. Büyük ölçüde zararsız olsa da adı kötüye çıkmış, "Nobel sperm bankası" olarak bilinen örgüt tam da bu tuzağa düşmüştür. Biyokimyager George Wald, buraya ödüllü spermini bağışlamaya davet edildiğinde, onun spermine değil, babası gibi (kasıklarının bir deha kaynağı olacağı tahmin edilmeyen yoksul bir göçmen terzi) insanların spermine ihtiyaç olduğunu söyleyerek bu daveti geri çevirmişti. Nobel Ödüllü Wald, "Benim spermelerim bu dünyaya ne verdi?" diye soruyordu. "İki gitarist!" Deha ya da genel olarak zeka kesinlikle kahtılabilir (bu da genlerin sonucu belirlemek yerine etkilediği anlamına gelir), ama seks

her şeyi tahmin edilemez bir ikramiye çekilişine çevirir.

Çoğumuz (bir üreme biçimi olarak) seksin büyüünün tam da bu varyasyon yaratma, şapkadan her seferinde eşsiz bir varlık çıkarma becerisinde yattığını hissederiz. Ama matematiksel bir genetikçinin titizliğiyle incelendiğinde, çeşitlilik olsun diye çeşitliliğin iyi bir şey olup olmadığı o kadar da belli değildir. Başarılı bir bileşim neden bozulsun, neden kopyalanmasın? Bir Mozart'ı ya da George Bernard Shaw'u kopyalamak Tanrı'yı oynamak, insanlığın kendi kendisini kabartan kibrinin bir tezahürü gibi görülüp çoğu insanı sarsabilir, genetikçilerin düşündüğü bu değildir. Onların düşünme biçimleri biraz daha sıradandır, seksin doğurduğu sınırsız çeşitlilik doğruca sefalet, hastalıklara ve ölümlere yol açabilir, oysa katıksız bir kopya böylesi sorunlara yol açmaz. Seçilimin çarmihında ateşe verilmiş gen bileşimlerini koruyarak klonlama genellikle en iyisidir.

Basit bir örnek verelim, orak hücre anemisini düşünün. Bu ağır bir genetik hastalıktır, alyuvarlar kabaca bir orak şekli alır, bu yüzden de incecik kılcal damarlardan geçemezler. Sebebi bir genin iki "kötü" kopyasının kalıtımla miras alınmasıdır. Doğal seçim kötü geni neden elemiyor diye sorabilirsiniz. Çünkü "kötü" genin tek kopyası aslında yararlıdır. Ebeveynlerimizden bir "iyi" bir "kötü" kopya alırsak, orak hücre anemisine yakalanmamanın yanı sıra, alyuvarları etkileyen bir başka hastalık olan sıtmaya yakalanma ihtimalimiz de zayıflar. Orak hücre geninin tek bir "kötü" kopyası alyuvarların zararını değiştirir, hücrelere tehlikeli bir orak şekli vermeksizin sıtma parazitlerinin hücre içine girmesini engeller. Sadece kopyalama (yani eşeysiz üreme) bu yararlı "karma" genotipi her seferinde bir sonraki kuşağa aktarabilir. Seks, genleri amansızca karıştırır. Her iki ebeveynin de bu karma genotipe sahip olduğunu varsayarsak çocuklarının yarısı karma genotipi miras alır, ama dörtte biri genin iki "kötü" kopyasını alır, bu yüzden de bu yavrular orak hücre anemisine yakalanırlar, diğer bir dörtte birde genin iki "iyi" kopyası bulunur, bu yüzden de bunların sıtmaya yakalanma riskleri yüksek olur, en azından gezegenin (sıtma taşıyan) sivrisineğe maruz ka-

lan geniş bölgelerinden birinde yaşıyorlarsa. Başka bir deyişle, daha büyük bir çeşitlilik nüfusun en az yarısını ciddi bir hastalık riskiyle karşı karşıya bırakır. Seks, hayatları doğrudan mahvedebilir.

Bu durum seksin yegane dezavantajı olmaktan çok uzaktır. Aslına bakarsanız, sakıncalar listesi aklı başında bir insanı ebediyen bu fikirden uzaklaştırabilir. Jared Diamond bir zamanlar "Seks Neden Eğlencelidir?" başlıklı bir kitap yazmıştı, ama tuhaftır, bir cevap vermekten kaçınmıştı. Cevabın belli olduğunu düşünmüş olsa gerek: Seks eğlenceli olmasaydı, aklı başında hiç kimse bu işe bulaşmazdı. O zaman nerelerde olurduk?

Shaw'un temkinli olmayı bir kenara bırakıp hem akıllı hem güzel bir çocuk sahibi olmak için şansını denediğini düşünelim. Güzel yıldızın da mesleğinin kinayeli şöhretine layık olduğunu hayal edelim, Victoria devrinde zirvedeydi bu şöhret, Yıldızın muhtemelen zührevi bir hastalığı vardı, diyelim ki frengi hastasıydı. Shaw ile güzel yıldızın tanışması, antibiyotiklerin geliştirilmesinden, frenginin yoksul askerler, müzisyenler, ressamlar ve onların sık sık ziyaret ettikleri, gecelerin onlar kadar yoksul hanımları arasında saldırdığı dehşeti epeyce yitirmesinden önce gerçekleşmişti. O devirlerde Nietzsche, Schumann ve Schubert gibi kişiliklerin ürkütücü bir biçimde çılgınlığın pençesine düşmeleri, cinsel kabahatlerin cezalandırılmasını epeyce sahici kılıyordu. O günlerde, arsenik ve cıva gibi çığırkanlığı yapılan ilaçların da berbatlıkta aşağı kalır yanı yoktu. Venüs'ün kollarında geçirilen bir gecenin, insanı ömür boyu Merkür'e (cıva) köle ettiği söylenirdi.

Frengi, bugün dünya çapında giderek yaygınlık kazanan AIDS gibi birçok nahoş ya da ölümcül zührevi hastalıktan sadece biriydi. AIDS'in Sahara altı Afrika ülkelerindeki yükselişi çarpıcı ve skandal niteliğindedir, ama aynı zamanda seksin çılgınca bir uğraş olduğunu da düşündürür. Bu satırları yazdığım sırada, 24 milyon Afrikalı HIV taşıyor, virüsün genç yetişkinler arasında yaygınlığı %6 düzeyinde. En feci etkilenen ülkelerde yaygınlık %10'un epey üstünde, buna bağlı olarak bu ülkelerde

ortalama ömür süresinde de on yılı aşkın bir gerileme gözleniyor. İlaç yetersizliği, yoksulluk ve verem gibi ölümcül hastalıklar hiç kuşkusuz bu krizi ağırlaştırırsa da, korunmasız seks hâlâ sorunun en büyük kısmını oluşturuyor.² Ama sebep ne olursa olsun, sorunun gerçek boyutu çılgınca seks yapıldığı fikrine yatkındır.

Ama biz Shaw'a geri dönelim. Shaw'un güzel yıldızla korunmasız seks yapması, ebeveynlerinin en berbat özelliklerine sahip bir çocuğun doğmasına, kendisinin de hastalanıp çıldırmasına yol açabilirdi. Ama Shaw'un, birçoğumuzun tersine bazı avantajları da vardı. Güzel yıldızın teklifiyle karşılaştığında, Shaw çoktan zengin ve ünlü olmuştu, sadece anekdotlar için değil, modern söyleyişle bebekler için de bir mükness haline gelmişti. Sekse razı olarak en azından bazı genlerinin zaman ırmağında akmasını sağlama şansına sahipti. Doğru eş, hatta bir eş arayışındaki birçokları gibi sefilik ve işkencelere katlanması gerekmiyordu.

Hayli anlam yüklü cinsel politika mevzusuna dalmak istemiyorum. Bir eş bulmanın, dolayısıyla genlerini gelecek kuşaklara aktarmanın bir bedeli olduğu aşıkarmış gibi görünüyor. Mali bir bedeli kastetmiyorum, gerçi ilk randevuda hesabı ödeyenler ya da bir boşanma anlaşmasından sonra sendeleye sendeleye yol alanlar bu mali bedeli şiddetle hissederler. Herhangi bir yalnız kalpler sütununun ya da internet üzerinden buluşma sitelerinin yaygınlaşmasının da açıkça gösterdiği üzere, hislerin karşılıksız kalmasının, harcanan zamanın boşa gitmesinin bedelinden bahsediyorum. Ama asıl bedeli, biyolojik bedeli insan toplumlarında derinlemesine yakalamak zordur, çünkü kültür ve görgü kuralları katmanlarının altına gömülmüştür. Ciddi bir biyolojik bedel olduğundan kuşkunuz varsa, tavuskuşunun kuyruğunu bir düşünün; erkek bereketi ve zindeliğinin simgesi olan o muhteşem tüyler hiç kuşkusuz hayatta kalma açısından bir risktir, tıpkı başka birçok kuşun renkli kur yapma oyunları gibi. Herhalde bunlara verilebilecek en çarpıcı örnek de sinekkuşudur. Ne kadar muhteşem olurlarsa olsunlar, 3400 sinekkuşu türü eş bulmanın bedelini temsil eder, sinekkuşlarının değil (onlar için

de bu bedelin ağır olduğuna kuşku yoktur) çiçekli bitkilerin eş bulmasının bedelinden bahsediyorum.

Bulundukları yere kökleriyle tutunmuş olan bitkiler, eşeyli organizmaların en akıldışı örnekleridir, ama ezici çoğunluğu kesinlikle eşeyli organizmadır; sadece karahindibalar ile birkaç başka tür sekse burun kıvrır. Geri kalanlar bir yolunu bulur, en seyre değer yol da çiçekli bitkilerin nefes kesici güzelliğidir, 80 milyon yıl önce dünyayı tarayıp geçmişler, sıkıcı yeşil ormanları bugün bildiğimiz büyümlü renklerle bezemişlerdir. İlk olarak Jurassic Çağı'nın son dönemlerinde, herhalde 160 milyon yıl önce evrilmiş olsalar da, yerküreyi ele geçirmeleri uzun süre ertelenmiş, nihayetinde arılar gibi polen taşıyıcı böceklerin yükselişiyle birlikte gerçekleşmiştir. Bir bitki için çiçekler saf bedeldir. Muh-teşem renkleri ve şekilleriyle polen taşıyıcıları çekmeleri, bu gibi ziyaretleri değerli kılmak için (ağırlık itibarıyla dörtte biri şekerden oluşan) nektar üretmeleri gerekir; kendilerini ne çok yakına dağıtmalıdır (aksi takdirde çiçeklerin kendi içlerinde döllenmeleri seksi amaçsız hale getirir) ne de çok uzağa (yoksa polen taşıyıcılar bir eşi dölemeyi başaramazlar). Bir polen taşıyıcıda karar kılındığında, çiçek ve polen taşıyıcı paralel bir evrim gösterir, her biri bedelleri ve yararları diğerine dayatır. Hiçbir bedel de minik bir sinekkuşunun bitkilerin durağan seks hayatı için ödediği bedel kadar aşırı değildir.

Sinekkuşunun minik olması gerekir, çünkü daha büyük hiçbir kuş kanatlarını saniyede 50 kez çırparak bir çiçeğin derin gırtlığının üzerinde hareketsiz kalamaz. Minik boyutlar ve havada asılı kalmak için gerekli muazzam metabolik hızın birleşmesi, sinekkuşlarının neredeyse hiç durmadan beslenmek zorunda oldukları anlamına gelir. Sinekkuşları her gün yüzlerce çiçeği ziyaret ederek ağırlıklarının yarısını aşkın nektar alırlar. Uzun bir süre (bir-iki saati aşkın bir süre) boyunca beslenmeyi kesmeye zorlanırlarsa, komayı andıran bir uyuşukluk içinde bilinçlerini yitirirler; nabızları ve nefes alıp verişleri yavaşlayıp normal uykuda gözlenen hızın bir kesrine geriler, beden ısıları da serbest düşüşe geçer. Bitkilerin büyüleyici iksirleriyle baştan çıkarılıp

bir esaret hayatına mahkum edilmişlerdir, dur durak bilmeden o çiçek senin, bu çiçek benim gezerler, polen dağıtırlar ya da koma-ya girip büyük ihtimalle ölüp giderler.

Bütün bunlar yeterince kötü değilmiş gibi, cinselliğin daha derin bir ikilemi daha vardır: Bir eş bulmanın bedeli, bir eş sahibi olmanın bedelinin yanında hiçbir şeydir. İşte size seksin iki yönlü bedeli. Erkeklerin varoluşuna sövüp sayan öfkeli feministin çok haklı olduğu bir nokta vardır. Öyle görünüyor ki erkekler gerçekten de ağır bir bedeldir, hem bakire olup hem doğurma sorununu çözen bir kadın da Meryem Ana olmayı hak eder. Birkaç erkek çocuk bakımının yükünü ya da maddi geçimi sağlamayı üstlenerek varoluşlarını gerekçelendirmeye çalışsalar da, aynı şey, insan olsun olmasın birçok yaratık açısından geçerli değildir; erkekler kelimenin tam anlamıyla becerip kaçarlardı. Hal böyleyken, hamile kalan dişiler aynı sayıda oğullar ve kızlar doğurur. Kadının çabalarının yarısı, dünyaya bu sorunu ağırlaştıran nankör erkekler getirmeye harcanır. Babanın bakımının söz konusu olmadığı herhangi bir türde, ebediyen erkeksiz yapabilen bir dişi, üreme başarısını ikiye katlardı. Kendilerini kopyalayan dişilerden oluşan bir ırkın her kuşakta sayısını ikiye katlaması, birkaç kuşaklık süre zarfında, cinsellikle üreyen akrabalarını nüfustan silmesi gerekirdi. Tümüyle aritmetik bir bakış açısıyla, kendi kendisini kopyalayabilen tek bir dişi, eşeyli üreyen bir milyon bireylik bir nüfusu sadece 50 kuşak içinde geride bırakabilir!

Bunu bir de hücreler düzeyinde düşünelim. Klonlanarak üremede –hem bakire olup hem doğurmak– bir hücre ikiye bölünür. Eşeyli üremeyse aslında bunun tersidir. Bir hücre (sperm) bir başka hücreyle (yumurta) birleşerek tek bir hücre (dölllenmiş yumurta) oluşturur. Böylece iki hücre bir tek hücre oluşturur: Geriye doğru bir kopyalamadır bu. Cinselliğin iki yönlü bedeli kendisini gen sayılarında gösterir. Her cinsiyet hücresi (sperm ve yumurta), ebeveyninin genlerinin sadece %50'sini bir sonraki kuşağa geçirir. İki hücre birleştğinde, genlerin tam kotası yeniden tesis edilir. geçiren bir bireyin iki yönlü bir avantajı vardır. Her klon eşeyli bir organizmadan iki kat daha fazla gen geçirdiği için, klonun

genleri nüfusa hızla yayılacak, nihayetinde eşeyli üreme genlerinin yerini alacaktır.

İşler daha da beter bir hal alır. Genlerinizin sadece yarısını bir sonraki kuşağa geçirmeniz, bencil genleri olan başka her tür şaibeli kurnazlığa kapıyı aralar.³ Sekste en azından prensip itibarıyla bütün genlerin bir sonraki kuşağa geçirilme olasılığı kesinlikle %50'dir. Pratikte bu, uçkağıtçıların daha iyisini yapmalarına, kendi bencil çıkarlarına göre davranıp yavruların %50'den fazlasına genlerini geçirmelerine fırsat tanır. Bu aslında gerçekleşmeyen kuramsal bir olasılık değildir. Genler arasındaki çatışmanın birçok örneği vardır: kanunları çiğneyen asalak genlerin ve onları durdurmak için birleşen kanunlara saygılı çoğunluğun örnekleri. Spermi, hatta bu genleri almayan yavruları öldüren, erkekleri kısırlaştıran, diğer ebeveynde aynı sayıda geni etkisiz hale getiren asalak genler ve genom boyunca yayılan sıçrayan genler vardır. Bizimki de dahil birçok genom, dördüncü bölümde görmüş olduğumuz üzere, bütün genom boyunca bir zamanlar kendilerini kopyalamış sıçrayan genlerin kalıntılarıyla doludur. İnsan genomu, ölüp gitmiş sıçrayan genler mezarlığıdır; kelimenin tam anlamıyla, insan genomunun yarısı bu genlerin çürümüş cesetlerinden oluşur. Başka genomlarda durum daha da berbatır. Buğday genomunun inanılmaz büyüklükte bir bölümü, %98'i ölü sıçrayan genlerden oluşur. Oysa tersine, kendilerini kopyalayan çoğu organizmanın daha derli toplu genomları vardır ve belli ki hiç de bu biçimde asalak genlere kurban gitmezler.

Neresinden bakarsak bakalım, ihtimaller, bir üreme biçimi olarak cinselliğin aleyhine muazzam derecede yüklüdür. Mucit bir biyolog cinselliğin yararlı olabileceği tuhaf koşullar düşünebilir, ama çoğumuz, dışarıdan baktığımızda cinselliği bir acayiplik olarak görüp bir kenara bırakmak zorunda kalırdık. Bir kere bakire doğumla karşılaştırıldığında iki yönlü bir maliyeti var; koskoca genomları sakatlayabilecek bencil genetik asalaklar yayıyor; bir eş bulma maliyeti getiriyor; çok korkunç zührevi hastalıkların yayılmasına neden oluyor ve en başarılı gen bileşimlerinin hepsini sistematik olarak ortadan kaldırıyor.

Fakat bütün bunlara rağmen, cinsellik bütün karmaşık hayat biçimlerinde evrensel olmaya, ümitleri boşa çıkaracak kadar yakındır. Neredeyse bütün ökaryot organizmalar (bir çekirdeği olan hücrelerden oluşanlar; bkz. dördüncü bölüm) hayat döngülerinin bir noktasında cinsellikle uğraşır, bitkiler ve hayvanların büyük bir çoğunluğu da *meçburen* eşeylidir, bu da demek oluyor ki ancak cinsellikle üreyebiliriz. Şaka değil. Klonlanarak üreyen aseksüel türler, hiç kuşkusuz nadirdir, ama karahindibalar gibi bazıları burnumuzun dibinde oynar. Şaşırtıcı gerçek şudur ki bu klonların neredeyse hepsi nispeten yakın dönemde ortaya çıkmış türlerdir, genellikle milyonlarca değil, binlerce yıl önce doğmuşlardır. Hayat ağacının en küçük filizleridir ve yok olmaya yazgılıdır. Birçok tür klonlamaya başvurmuştur, ama bir türün ömründe olgunluk çağına pek erişememişler, sessiz sedasız kaybolup gitmişlerdir. Bilinen ancak bir avuç antik klon, on milyonlarca yıl önce oluşup ilgili türlerden geniş gruplar oluşturmuştur. Bunu yapabilenler, örneğin bdelloid tekerlekli hayvanlar biyolojik şöhretlerdir, sekse kafayı takmış bir dünyanın iffetli istisnalarıdır, genelevler sokağından keşişler gibi geçip giderler.

Seks çılgınca bir uğraş, varoluşsal bir saçmalık, seks yapmamak daha da beterdir, çünkü çoğu koşulda neslin tükenmesine yol açan, varolmayışsal bir saçmalıktır. Bu yüzden de seksin büyük yararları olması gerekir, seks yapmanın aptallığını ezip geçecek büyüklükte avantajlar. Bu avantajları tespit etmek şaşırtıcı derecede zordur, bu yüzden de cinselliğin evrimi yirminci yüzyılın büyük bölümü boyunca evrimle ilgili problemlerin “kraliçesi” olmuştur. Cinsellik olmasaydı, büyük karmaşık hayat biçimleri hiç mümkün olmayabilirdi, birkaç kuşak içinde hepimiz çözüldür giderdik, dejenere Y kromozomu gibi cürüyüp gitmeye yazgılı olurduk. Her ne olursa olsun seks, sessiz ve içe dönük, kendi kendisini kopyalayan asık suratlı şeylerle (Kadim Denizci şiirindeki “binlerce binlerce sümüksü şey” dizelerini hatırladım) dolu bir gezegenle çevremizdeki haz ve görkem patlaması arasındaki farkı yaratan şeydir. Cinselliğin olmadığı bir dünya, kadınların ve erkeklerin, kuşların ya da kurbağaların şarkılarının

olmadığı, çiçeklerin muhteşem renklerinin görülmediği, gladya-törce çekişmelerin yaşanmadığı, şiirsiz, sevgisiz, mest olmanın olmadığı bir dünya olurdu. Yarardan yoksun bir dünya olurdu. Cinsellik hiç kuşkusuz hayatın en büyük icatlarından biri olarak gururla karşımıza dikiliyor, ama neden ve nasıl evrildi?



Darwin, cinselliğin yararları üzerine ilk düşünenlerden biriydi, her zaman olduğu gibi pragmatik bir yaklaşımla düşünmüştü. Ona göre cinselliğin başlıca yararı, melezlenmenin kuvvetiydi; birbiriyle akraba olmayan iki ebeveynin yavruları, yakın akraba ebeveynlerin çocuklarına nazaran daha güçlü, daha sağlıklı ve daha zinde oluyordu, hemofili ya da Tay Sachs hastalığı gibi doğuştan gelen hastalıklara yakalanma riskleri de o kadar azalıyordu. Örnekler boldu. Çok fazla aile içi döllenmenin olumsuz etkilerini görebilmek için, Avrupa'nın kadim hanedanlarından Habsburglar gibi hastalıklı ve deli bir topluluğa bakmak yeterlidir. Darwin'e göre, cinsellik aile dışından bireylerle döllenmeyle ilgiliydi o halde, gerçi bu durum onun birinci dereceden kuzeni, erdem abidesi Emma Wedgewood'la evlenip on çocuk sahibi olmasını engellememiştir.

Darwin'in cevabının iki büyük meziyeti vardı, ama genlerden hiç haberi olmamasından mustarıptı. Büyük meziyetleri, melezlenmenin kuvvetinin yararlı olduğu ve bu yararların bir bireye odaklı olmasıdır; aile dışından döllenmenin çocukluklarında ölüp gitmeyen sağlıklı çocuklar üretmesi ihtimali fazladır, böylece daha fazla genimiz bir sonraki kuşağa ulaşır. Geniş çaplı bir önemi olan, Darwinci hoş bir açıklamadır bu; burada doğal seçim büyük gruplardan ziyade bireyler üzerinden işler, bu açıklamaya daha sonra döneceğiz. Sorun şudur ki bu aslında sadece aile dışından döllenmeyle ilgili bir açıklamadır, cinsellikle ilgili değildir. Hikayenin yarısı bile etmez.

Cinsellik mekanizmasının uygun biçimde anlaşılması, onlarca yıl sonra, Avusturyalı keşiş Gregor Mendel'in bezelyelerin özellikleriyle ilgili meşhur gözlemleri yirminci yüzyıl başında

yeniden keşfedildiğinde gerçekleşti. İtiraf etmem gerekir ki Mendel kanunlarını anlaşılamaz denecek kadar sıkıcı bulurdum, biraz utanarak hatırlıyorum o günleri. Ama öyle bile olsa, Mendel kanunlarını olduğu gibi es geçerse temel genetiği kavramanın daha kolay olacağı kanısındayım, çünkü bu kanunlar genler ve kromozomların yapısına dair gerçek bir bilgi olmaksızın açıklanmıştır. Biz doğruca kromozomları gen zincirleri olarak düşünmeye geçelim, böylece cinsellikte neler olup bittiğini, Darwin'in açıklamasının neden yetersiz kaldığını açıkça görebiliriz.

Cinsellikte ilk adım, daha önce gördüğümüz üzere iki eşeyli hücrenin (sperm ve yumurtanın) birleşmesidir. Bunların her biri bu birleşmeye tek bir kromozom kümesi getirir, döllenmiş yumurtaya tam iki kromozom kümesi verir. Bu iki kopya nadiren tam olarak birbirinin aynısıdır, "iyi" kopya zayıf versiyonun etkilerini maskeleyebilir. Melezlenme kuvvetinin temeli budur. Aile içi döllenme gizli hastalıkların maskesini düşürür, çünkü ebeveynleriniz yakın akrabaysa aynı genin iki zayıf kopyasını kalıtımla miras alma ihtimaliniz daha yüksektir. Ama bu aslında cinselliğin bir avantajı olmaktan çok, aile içi döllenmenin bir dezavantajıdır. Melezlenme kuvvetinin avantajı her kromozomun bir diğerinin zayıflığını "örtebilecek" biraz farklı bir kopyasının bulunmasında yatar, ama bu eşeyli organizmalar kadar her kromozomun iki kopyasına sahip klonlar için de geçerlidir. O halde melezlenmenin kuvveti, cinselliğin kendisinden değil, iki farklı kromozom kümesine sahip olmaktan kaynaklanır.

Cinsellik açısından kilit önem taşıyan, açıklaması en zor adım, ikinci adımdır; eşeyli hücrelerin, her biri her genin tek bir kopyasını taşıyacak şekilde yeniden üretilmesidir. Bu süreç "mayoz bölünme" olarak bilinir, dışarıdan bakıldığında hem zarif hem kafa karıştırıcı bir süreçtir. Zariftir, çünkü kromozomların dansında, eşlerini bulduklarında onlara bir süre sıkıca sarılıp sonra hücrenin karşıt kutuplarına yönelmelerinde öyle bir güzellik ve kesinlik gösteren bir koreografi vardır ki mikroskobinin öncüleri gözlerini bu danstan alamamış, kromozomları bu dans sırasında yakalamak için boya üstüne boya karıştırmışlar-

dır: Tıpkı ünlerinin zirvesinde olan bir akrobatik dans grubunun kumlu eski fotoğrafları gibi. Kafa karıştırıcıdır, çünkü bu dansın adımları koreografların en faydacısından, Tabiat Ana'dan beklenmeyecek kadar zariftir.

“Mayoz” terimi Yunancadan gelir ve “küçültmek” ya da “azaltmak” anlamına gelir. Mayoz bölünme her kromozomun iki kopyasına sahip bir hücreyle başlar, her bir eşeyli hücreye her kromozomun bir kopyasının verilmesiyle son bulur. Bu yeterince anlaşılabilir bir durumdur: Eğer cinsellik, iki kromozom kümesi olan yeni bir bireyin ortaya çıkması için iki hücrenin birleşmesiyle işliyorsa, eşeyli hücrelerin her birinin bir küme alması halinde daha kolaydır. Şaşırtıcı olan şey, mayoz bölünmenin bütün kromozomların kopyalanması ile başlamasıdır, böylece başlangıçta her hücrede dört küme kromozom olur. Bu kromozom kopyaları daha sonra karıştırılıp eşleştirilerek (teknik terimle “rekombine edilerek”) tümüyle yeni dört kromozom oluşturulur; kromozomların her biri diğerlerinden küçük parçalar almıştır. Rekombinasyon seksin kalbidir. Bu şu anlama gelir: Bir zamanlar babanızdan gelen bir gen, kendisini annenizden gelen bir genle fiziksel olarak aynı kromozomda bulur. Bu numara her kromozomda birkaç kez tekrarlanabilir, örneğin *babadan-babadan-anadan-anadan-anadan-babadan-babadan* gibi bir gen dizilimi ortaya çıkar. Yeni oluşan bu kromozomlar artık benzersizdir, sadece birbirlerinden farklı olmakla kalmazlar, gelmiş geçmiş başka bütün kromozomlardan da kesinlikle farklıdırlar. (Çünkü çaprazlamalar rastgele ve genellikle farklı yerlerdendir.) Son olarak, hücre ikiye bölünür, yavru hücreler de yeniden bölünür, böylece dört tane “torun” hücre oluşur, her birinde benzersiz kromozomlardan oluşan tek bir küme vardır. İşte cinsellik budur.

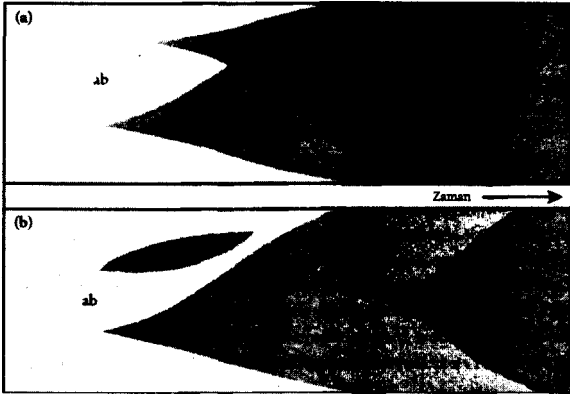
O halde cinselliğin ne yaptığı açıktır, genleri yeni kombinasyonlar haline getirir, belki de daha önce hiç var olmamış kombinasyonlar. Bunu sistematik olarak, bütün genomda yapar. Bu, bütün oyuncuların istatistiksel olarak eşit bir el alabilmesi için önceki bütün kombinasyonları bozarak bir iskambil destesini karmaya benzer. Soru şudur: Neden?



Bugün bile çoğu biyoloğa sezgisel olarak en akla yatkın gelen cevabın tarihi, Darwin'in varisi olarak görülen dahi Alman düşünür August Weismann'a uzanır. Weismann 1904'te cinselliğin, doğal seçilimin üzerinde işleyebileceği daha büyük bir çeşitlilik yarattığını savunmuştu. Cevabı Darwin'inkinden çok farklıydı, çünkü Darwin'in tersine, cinselliğin yararının bireye değil, nüfusa olduğu anlamına geliyordu. Weismann, cinselliğin genlerin "iyi" ve "kötü" kombinasyonlarını ortaya çıkarma ihtimalinin aynı olduğunu söylüyordu. "İyi" kombinasyonların, sahipleri-ne doğrudan yararı olabilir, "kötü" kombinasyonların da doğrudan bir o kadar zararı dokunabilir. Bu demektir ki herhangi bir kuşakta bireyler açısından cinselliğin net bir avantajı ya da dezavantajı yoktur. Weismann, buna rağmen nüfusun genelinin iyileştiğini, çünkü kötü kombinasyonların doğal seçimle ayıklandığını, nihayetinde (birçok kuşak sonra) geride çoğunlukla iyi kombinasyonların kaldığını savunuyordu.

Elbette ki cinsellik kendi başına bir nüfusa yeni bir çeşitlilik katmaz. Mutasyonlar olmazsa, cinsellik etrafta mevcut genleri sadece yeniden karar, kötü genleri ayıklar, böylece nihayetinde çeşitliliği sınırlar. Ama denkleme büyük istatistiksel genetikçi Ronald Fisher'ın 1930'da yaptığı gibi azıcık yeni mutasyon eklerseniz, cinselliğin avantajları daha belirgin bir hal alır. Fisher, mutasyonlar ender rastlanan olaylar olduğundan, farklı mutasyonların büyük ihtimalle farklı bireylerde ortaya çıkacağını savunuyordu. Aynı şekilde, bir yıldırımın aynı bireyi iki kez çarpmak yerine iki farklı bireyi çarpması daha büyük ihtimaldir. (Gerçi mutasyonlar da yıldırım da aynı kişiyi iki kez çarpabilir.)

Fisher'ın argümanını örneklemek için, klonlanarak üreyen bir nüfusta iki yararlı mutasyon ortaya çıktığını varsayalım. Bu mutasyonlar nasıl yayılacaktır? Cevap, ancak ve ancak birbirleri aleyhine ya da bu mutasyonlardan yoksun bireyler aleyhine yayılacaklarıdır (Şekil 5.1). İki mutasyon da aynı ölçüde yararlıysa, nüfus ikisi arasında yarı yarıya bölünebilir. Kilit önemde



Şekil 5.1 Yeni yararlı mutasyonların eşeyli (yukarıda) ve eşeysiz (aşağıda) organizmalarda yayılması. Eşeyli üremede, a genini A genine, b genini B'ye çeviren yararlı mutasyonlar hızla yeniden birleşerek en iyi AB genotipini oluşturur. Eşeyli üreme olmazsa A ancak B'nin zararına yayılabilir, aynı şey tersi için de geçerlidir, bu yüzden de en iyi genotip olan AB ancak B mutasyonu bir Ab nüfusunda yeniden ortaya çıktığında oluşabilir.

bir nokta, ikinci mutasyon ilk mutasyona zaten sahip olan bir bireyde tekrar ortaya çıkmadığı (yani yıldırım iki kez çarpmadığı) sürece hiçbir bireyin aynı anda iki mutasyondan birden yararlanamayacak olmasıdır. Bunun sıklıkla mı yoksa nadiren mi gerçekleşeceği, mutasyon hızı ve popülasyonun büyüklüğü gibi etkenlere bağlıdır; ama genellikle, yararlı mutasyonlar sıkı sıkıya klonlanarak üreyen popülasyonlarda nadiren bir araya gelir.⁴ Eşeyli üremeyse, her iki mutasyonu olağanın sınırlarının aşıldığı tek bir anda bir araya getirebilir. O halde Fisher'a göre, cinselliğin yararı, yeni mutasyonların aynı bireyde neredeyse anında bir araya getirilmesi ve doğal seçilime bu mutasyonların birleşik uygunluklarını sınama şansının tanınmasıdır. Yeni mutasyonlar gerçekten de daha büyük bir uygunluğa sahipse, cinsellik bunların nüfusun tamamına hızla yayılmasını, organizmaların daha iyi uyarlanmasını ve evrimin hızlanmasını sağlar (Şekil 5.1).

X-ışınlarının genlerde mutasyon yarattığını keşfederek 1946'da Nobel Tıp Ödülü'nü alan Amerikalı genetikçi Hermann Müller daha sonra bu argümanı zararlı mutasyonları içerecek şekilde geliştirmiştir. Meyve sineklerinde şahsen binlerce mutasyon

yaratan Müller, yeni mutasyonların çoğunun zararlı olduğunu herkesten iyi biliyordu. Müller'e göre, klonlanarak üreyen bir nüfusun bu gibi zararlı mutasyonlardan nasıl kurturabileceği sorusu etrafında daha derin bir felsefi soru dönüyordu. Müller, neredeyse bütün sineklerde bir ya da iki mutasyon olduğunu, geriye genetik olarak "temiz" pek az birey kaldığını düşünelim diyordu. Peki sonra ne olurdu? Klonlanarak üreyen küçükçe bir popülasyonda uygunluk açısından geri dönüşü olmayan çark benzeri bir gerilemeden kaçış söz konusu olamaz. Sorun şudur ki üreme ihtimali sadece genetik uygunluğa değil, şansa, doğru zamanda doğru yerde olmaya da bağlıdır. İki sinek düşünelim, birinde iki mutasyon var, diğerinde hiç yok. Mutant sinek kendisini bir ziyafet sofrasında buluyor, temiz sinekse açlıktan ölüyor; Daha az uygun olsa da, sadece mutant yaşayıp genlerini aktarabiliyor. Şimdi, açlıktan ölen sineğin, türünün son örneği, mutant olmayan tek sinek olduğunu düşünelim: Popülasyonda hayatta kalan diğer bütün sineklerde en az bir mutasyon vardır. Mutant bir sinek geriye doğru bir mutasyon yaşamadığı sürece, (çok ender rastlanan bir olaydır) popülasyonun tamamının uygunluğu önceye nazaran daha azdır. Aynı senaryo tekrar tekrar oynanabilir, her seferinde buna bir çarkın dişlerinin kilitlenmesi eşlik eder. Nihayetinde popülasyonun tamamı o kadar dejenere hale gelecektir ki nesli tükenecektir, bugün Müller çarkı olarak bilinen bir ilerleyiştir bu.

Müller çarkı şansa dayanır. Popülasyon son derece genişse, şansın etkili olması ihtimali ve en uygun bireylerin hayatta kalması yönündeki istatistiksel olasılık azalır. Geniş bir popülasyonda, çirkin bir akıbetin okları ve yayları etkisiz hale gelecektir. Üreme hızı yeni mutasyonların birikme hızından fazlaysa, popülasyonun tamamı çarkın işleyişinden kurtulur. Öte yandan, popülasyon küçükse ya da mutasyon hızı yüksekse, çark işlemeğe başlar. Bu gibi koşullar altında klonlanarak üreyen bir nüfus çürümeye, mutasyonları geri döndürülemez bir şekilde biriktirmeye başlar.

Cinsellik günü kurtarır, çünkü mutasyon geçirmemiş genleri aynı bireyde bir araya getirerek yeniden bozulmamış bireyler

yaratabilir. Aynı şekilde, eğer iki araba bozulduysa (John Maynard Smith'in benzetmesini kullanarak diyelim ki birinin vitesi, diğerinin motoru bozuk) cinsellik işlevsel kısımları birleştirerek işleyen bir araba yapan bir mekaniktir. Ama akıllı bir mekanğin tersine, cinsellik bozuk parçaları birleştirip işlemeyen bir çöp yığını yaratma zahmetine de girer. Her zaman olduğu gibi tarafsız olan cinselliğin bireysel yararları, bireysel zararlarla sürekli olarak silinir.

Cinselliğin bu tarafsızlığından kaçmanın bir tek yolu vardır, onu da bugün Michigan Üniversitesi'nde araştırma profesörü olan cin fikirli Rus evrim genetikçisi Alexey Kondrashov 1983'te ileri sürmüştür. Kondrashov Moskova'da bir zoolog olarak eğitim görmüş, sonra Puschino Araştırma Merkezi'nde kuramcı olmuştu, cinsellik hakkında çarpıcı sonuçlara varmasını sağlayan da hesaplama gücüydü. Kuramı, evrimciler arasında hâlâ garaz doğuran iki cesur varsayımda bulunur. İlki, mutasyon hızının, çoğu insanın tahmin ettiğinden yüksek olduğudur. Kondrashov'un kuramının işleyebilmesi için, her kuşakta her bireyde bir ya da daha fazla zararlı mutasyon olması gerekir. İkinci varsayımsa, çoğu organizmanın tek tek mutasyonların etkilerine az çok dirençli olduğudur: Çok sayıda mutasyonu aynı anda aldığımızda, uygunluk bakımından gerçekten gerilemeye başlarız. Örneğin, bedeninin bir ölçüde yedek parçaları varsa böyle bir şey olabilir. Tıpkı bir böbrek, bir akciğer, hatta bir göz kaybettiğimizde (yedek organ işlemeyi sürdüreceğinden) idare edebileceğimiz gibi, genler düzeyinde de işlevler bir ölçüde örtüşür. Birden fazla gen aynı şeyi yapıyor, ciddi hasarlara karşı bir bütün olarak sistemi koruyor olabilir. Genlerin bu şekilde "birbirinin yerine geçebileceği" doğruysa, tek bir mutasyonun feci etkileri olmayacaktır; Kondrashov'un kuramı da işleyebilir.

Bu iki varsayımın nasıl bir katkısı vardır? İlk varsayım (mutasyon hızının yüksek olması), klonlanarak üreyen sonsuz derecede geniş popülasyonların bile Müller çarkından kurtuluşu olmadığı anlamına gelir: Kaçınılmaz olarak bozulacaklar, nihayetinde "mutasyona dayalı bir erime"den mustarip olacaklardır.

İkinci varsayım akıllıcadır: Cinselliğin bir seferde birden fazla mutasyondan kurtulabileceği anlamına gelir. Mark Ridley hoş bir benzetmeyle klonlama ve cinselliği, sırasıyla Eski ve Yeni Ahit'e benzetir. Mutasyonlar günah gibidir, der Ridley. Mutasyon hızı her kuşakta bire ulaşırsa (herkes günahkar olursa), klonlanarak üreyen popülasyonda günahattan kurtulmanın yolu bütün nüfusu yok etmektir: Bir tufanda boğuverirsin, üstlerine ateş ve kükürt salarsın ya da salgın hastalıkları musallat edersin. Tersine, eşeyli organizmalar zararsız çok sayıda mutasyonu biriktirebilirlerse (geri dönüşü olmayan bir eşiğe ulaşınca dek), bu durumda cinselliğin iki sağlıklı ebeveynin her birinde çok sayıda mutasyonu bir araya getirme ve bunların hepsini tek bir çocuğa odaklama gücü olur. Bu da Yeni Ahit yöntemidir. Tıpkı İsa'nın insanlığın toplu günahları için ölmüş olması gibi, cinsellik de bir popülasyonun birikmiş mutasyonlarını bir tek günah keçisinde bir araya getirip sonra o günah keçisini çarmıha gerebilir.

Kondrashov'un vardığı sonuç şudur: Büyük karmaşık organizmalarda mutasyonlardan kaynaklanan bir erimeyi sadece cinsellik önleyebilir. Bu da karşı konulamaz bir biçimde, karmaşık hayatın cinsellik olmadan mümkün olmayacağı sonucuna varır. İlham verici bir sonuçtur bu, ama genel olarak kabul görmüş değildir. Kondrashov'un her iki varsayımına karşı da şiddetli argümanlar ileri sürülmüştür, ayrıca mutasyon hızını da mutasyonlar arasındaki etkileşimleri de doğrudan ölçmek kolay değildir. Bir fikir birliği varsa, o da bazı durumlarda bu kuramın doğru olabileceği, ancak genellikle varsayımlarının dünyada yaşanan muazzam cinsellik miktarını açıklayamayacak kadar yanlış olduğu yönündedir. Kondrashov'un kuramı, büyük ve karmaşık olmayı umursamayan basit tek hücreli yaratıklar arasındaki seksin kökenine, dolayısıyla ilk günaha ilişkin de bir açıklama getirmez.



O halde, seks, elverişli gen bileşimlerini bir araya getirip elverişsiz bileşimleri bertaraf ederek popülasyonlara yararlı olur. Yirminci yüzyılın ilk yarısında bu mesele az çok kapanmış bir

dava olarak görülmeye başlanmıştı, Sir Ronald Fisher kendi kuramı hakkında bazı çekinceler getirmiş olsa da. Fisher da Darwin gibi genel olarak, seçilimin bireyler üzerinde etkin olduğu, bir bütün olarak türün yararına işlemediği inancındadır. Ne var ki kendisini rekombinasyon konusunda bir istisna yapmak zorunda hissetmişti, ona göre bu durumun “bireysel avantajdan ziyade türün avantajı için evrildiği yorumu getirilebilirdi”. Kondrashov’un kuramı bireylerin çoğunluğunu kayırsa, arada sırada birini çarmıha gerse bile, cinselliğin doğrudan yararları ancak birçok kuşak sonra hissedilebilir. Bu yararlar, en azından bildiğimiz anlamda bireylerin payına düşmez.

Fisher’ın yaktığı fitil ağır ağır yandı, ama zaman bombası sonunda 1960’ların ortalarında, evrimcilerin bencil gen fikri ve özgecilik (altruizm) paradoksuyla uğraşmaya başlamasıyla patladı. Evrim kuramının en büyük isimlerinden bazıları (George C. Williams, John Maynard Smith, Bill Hamilton, Robert Trivers, Graham Bell, Richard Dawkins) bu soruna eğildiler. Biyolojide pek az şeyin sahiden özgeci olduğu açıklık kazandı: Dawkins’in dediği gibi, bizler kendi çıkarlarımızı gözeterek davranan bencil genlerin kör kuklalarıyız. Bu bencillik açısından yaklaşıldığında soru şuydu: Üçkağıtçılar neden bir defada kazanıvermiyordu? Neden bir birey kendi çıkarlarını (klonlanarak üremek) türün payına ancak gelecekte uzak bir noktada düşecek bir yarara (genetik sağlık) feda eder? Olanca öngörümüze rağmen, biz insanlar yakın gelecekte kendi torunlarımızın çıkarına davranmakta zorlanıyoruz; ormansızlaştırmayı, küresel ısınmayı ve nüfus patlamasını bir düşünelim. Peki o zaman nasıl oluyor da kör, bencil evrim cinselliğin uzun vadede popülasyona yararlarını, kısa vadeli bedellerinin, bütün dezavantajlarıyla birlikte cinselliğin iki yönlü bedelinin önüne geçirebiliyor?

Olası bir cevap, kolayca “tersine evrilmeyeceği” için cinselliğe bağlı kaldığımızdır. Mesele böyleyse, cinselliğin kısa vadeli bedeli pazarlığa tabi değildir. Gelin görün ki bu argümanda bir şey vardır. Daha önce pratikte klonlanarak üreyen bütün türlerin yakın dönemde, milyonlarca değil, binlerce yıl önce ortaya

çıktığını söylemiştim. Klonlanarak üreyen türler nadiren ortaya çıkıp bir süre boyunca yaşıyor, sonra binlerce yıl içinde hızla tükenip gidiyorlarsa, görmeyi bekleyeceğimiz örüntü tam olarak budur. Aseksüel türlerin zaman zaman “çiçek açmaları”na rağmen, cinsellik nadiren tam olarak yerinden edilir, çünkü herhangi bir anda etrafta sadece birkaç aseksüel tür vardır. Aslında eşeyli organizmaların klonlamaya geçmesinin zor olmasının bazı “tesadüfi” sebepleri vardır ve bunlar iyi sebeplerdir. Örneğin, memelilerde imprinting (anneye ve babaya ait bazı genlerin işlememesi) olarak bilinen bir olgu, bir yavrunun her iki ebeveyninden de genler alması gerektiği, aksi takdirde bu genlerin işlemeyeceği anlamına gelir. Büyük ihtimalle, iki eşeye böyle bir bağlılığın tersine çevrilmesi, mekanik bakımdan çetrefildir: Hiçbir memeli cinsel alışkanlıklarından vazgeçmemiştir. Benzer şekilde kozalaklı ağaçlarda, iki eşeyin silinmesi zordur, çünkü mitokondriler yumurtaya kalıtımla miras alınırken, kloroplastlar polene miras alınır. Yaşayabilir olması için yavrunun ikisini de miras alması, iki ebeveyni olması gerekir. Yine bu yüzden, bütün kozalaklı ağaçlar eşeylidir.

Ama bu argüman da ancak buraya kadar gelebilir. Cinselliğin nüfusa yararlı olmakla kalmadığını, birey için de hemen görülen bazı yararları olması gerektiğini düşündürecek birkaç sebep vardır. Öncelikle çok sayıda tür (tek hücreli protistleri de katarsak muazzam sayıda tür) *ihtiyari* olarak eşeylidir; yani ara sıra cinsellikle uğraşırlar; hatta yaklaşık 30 kuşakta bir olacak kadar nadir şekilde. Aslına bakarsanız, parazit *Giardia* gibi bazı türler henüz iş üstünde yakalanmamıştır, ama mayoz için gerekli bütün genlere sahiptirler, bu da araştırmacılar bakmıyorken ara sıra kaçamak yapıp çiftleşebildikleri anlamına gelir. Bu mantık sadece gözlerden uzak tek hücreli organizmalar için değil, yılanlar, kertenkeleler ve otlar gibi koşullar dayattığında klonlanarak üremeden cinselliğe geçen bazı büyük organizmalar için de geçerlidir. Besbellidir ki bu türler istedikleri zaman klonlamaya geçebilirler, bu yüzden de “tesadüfi” bir engel cevap olamaz.

Benzer bir argüman, cinselliğin kökeni için de geçerlidir.

Cinsellik ilk ökaryotlar tarafından "icat edildiğinde" (ilerde bundan biraz daha bahsedeceğiz), klonlanarak üreyen daha geniş bir hücre popülasyonu içinde eşeyli olarak üreyen bir avuç hücre bulunuyor olsa gerekti. Popülasyona yayılmak için (böyle olması gerekmiştir, çünkü bütün ökaryotlar zaten eşeyli bir atadan türemiştir), cinsellik eyleminin, eşeyli olarak üreyen hücrelerin yavrularına bir avantaj olarak aktarılmış olması gerekir. Başka bir deyişle, cinsellik bir bütün olarak popülasyona değil, bir popülasyon içindeki bireylere yararlı olduğu için en başta yayılmış olmalıdır.

George C. Williams'ın 1966'da dile getirdiği de bu uyandırıcı kavrayıştı: Cinselliğin, iki yönlü bedeline rağmen, bireylere yararlı olması *gerektiği*di. Problem çözülmüş gibi görünüyordu, ama işte en kafa karıştırıcı haliyle yine orada olduğu gibi duruyordu. Cinselliğin eşeysiz bir nüfusta yayılabilmesi için, eşeyli bireylerin her kuşakta en az iki kat daha fazla sayıda hayatta kalabilen yavru üretmesi gerekiyordu. Fakat cinselliğin tarafsız bir mekanizması olduğu, her kazanana bir kaybeden, her iyi gen kombinasyonu için bir kötü kombinasyon olduğu da gayet iyi anlaşılmıştı. Meselenin hem incelikli hem devasa bir açıklaması olmalıydı, gözümüzün önündeydi, ama göremiyorduk. Bu meselenin, biyolojinin en iyi zihinlerini çekmiş olmasına şaşmamak gerekir.

Williams odak noktasını genlerden çevreye, daha da özel olarak ekolojiye çevirmişti. Ebeveynlerinizden farklı olmanız neden iyidir, diye soruyordu. Bu farklılık, bir ortam değişiyorsa önemli olabilir, diye de cevaphıyordu bu soruyu; örneğin çevre kuraklaşıyorsa ya da organizmalar yeni toprakları işgal ediyor, nişlerini genişletiyor, yayılıyor ya da göç ediyorlarsa. Williams klonlanarak üremenin, bir ikramiye çekilişi için hepsinin numarası aynı yüz bilet almaktan bir farkı olmadığı sonucuna varmıştı. Her birinin numarası farklı 50 bilet almak daha iyidir, seksin sunduğu çözüm budur.

Bu fikir akla yatkın gelir, hiç kuşkusuz geçerli olduğu durumlar da vardır; ama bu, verilerle tartılıp yetersiz olduğu anlaşılan

akıllıca birçok varsayımın ilkiydi. Cinsellik çevrenin değişmesine verilen cevapsa, zorlu koşullara tabi olan yüksek enlemlerde ya da dağlarda ya da bir sel olup bir kuruyan tatlı sularda cinselliğe daha fazla rastlamamız gerekir. Oysa genel bir kural olarak rastlamayız; göller, deniz ya da tropikal bölgeler gibi nüfusu hayli fazla olan istikrarlı çevrelerde daha fazla cinsellik vardır. Genel olarak, çevre değişiyorsa bitkiler ve hayvanlar tercih ettikleri koşulları izlerler, örneğin iklim ısındıkça kuzeye doğru göç ederler, çekilen buzların peşinden giderler. Çevrenin her kuşakta yavruların farklı olmasını gerektirecek kadar hızlı değişmesi ender rastlanan bir olaydır. Arada sırada olan cinselliğin gerçekten daha iyi olması gerekir. Çoğu kez klonlanarak üreyen, diyelim ki 30 kuşakta bir seks yapan bir tür, rekombinasyonun yararını kaybetmeksizin cinselliğin iki yönlü bedelini aşacaktır. Ne var ki çoğu kez, en azından bitkiler ve hayvanlar gibi büyük organizmalar arasında gördüğümüz şey bu değildir.

Başka ekolojik fikirler, örneğin yer için rekabet etmek de, verilere karşı koyamamıştır. İşte bu noktada, koşa koşa terk edilen sahnede, Kırmızı Kraliçe belirir. Belki onunla daha önce tanışmamışsınızdır, Kraliçe, Lewis Carroll'un muhteşem absürd eseri *Aynanın İçinden*'den sürreel bir karakterdir. Alice onunla tanıştığında kraliçe telaşla koşuyordur, ama bir yere de vardığı yoktur. "Şimdi burası, görüyorsun işte," der Kraliçe. "Olduğun yerde kalabilmek için tüm gücünle koşman gerekir." Biyologlar daimi bir rekabet haline kilitlenmiş (birbirleriyle yarışan, ama hiçbirinin uzun süre liderliği koruyamadığı) farklı türler arasındaki silahlanma yarışını ifade etmek için bu kavrayışa başvurmuş olsalar da, bu kavrayış en fazla cinselliğin evriminde yankı uyandırmıştır.⁵

Kırmızı Kraliçe varsayımı, birçoklarının "Darwin'den bu yana gelmiş geçmiş en seçkin Darwinci olarak değerlendirdiği" parlak bir matematiksel genetikçi ve doğabilimci olan Bill Hamilton tarafından 1980'lerin başında kuvvetle savunulmuştur. Hamilton, Darwinci kurama (özgeci davranışları açıklamaya yönelik akraba seçim modelleri geliştirmek gibi) bir dizi önemli katkıda bu-

lunduktan sonra, sonunda parazitlerin etkisi ve hükmü altında kaldı ve trajik bir şekilde, 1999'da Kongo'da her zaman olduğu gibi korkusuzca çıktığı bir keşif seferinde AIDS virüsü taşıyan şempanzeler ararken sıtma parazitine kurban giderek 2000'de 63 yaşında hayatını kaybetti. Akranı Robert Trivers, *Nature*'da kaleme aldığı dokunaklı bir vefat yazısında Hamilton için, "karşılaştığım en incelikli, en çok katmanlı zihne sahipti. Söylediklerinin genellikle iki, hatta üç anlamı olurdu, öyle ki bizler tek tek notalar halinde konuşup düşünürken o akorlar halinde düşünürdü," diye yazmıştı.

Hamilton'ın şevkli bir ilgi göstermesi öncesinde, parazitler adlarının kötüye çıkmasından mustarip olmuştu. Victoria döneminin etkili zoologlarından Ray Lankester parazitleri evrimsel dejenerasyonun aşağılık bir sonucu olarak görüp bir kenara bırakmıştı (Batı medeniyetini de böyle bir akıbetin beklediğine inanıyordu); Lankester'ın uğursuz gölgesi bir asır sonra bile zoologların tepesinde asılı duruyordu. Parazitoloji disiplini dışında pek az araştırmacı, yıllardır parazitologların anlamaya çabaladığı parazitlerin bir konaktan diğerine şekillerini ve niteliklerini değiştirmelerini, hedeflerine mucizevi bir kesinlikle kilitlenmelerini sağlayan incelikli uyarlanmalara yüz vermeye istekliydi. Parazitler dejenere olmak şöyle dursun, bilinen en akıllıca uyarlanmış türler arasında yer alır, bunun da ötesinde inanılmaz derecede başarılıdır, bazı tahminlere göre sayıları serbest yaşayan türlere nazaran dörde bir oranında fazladır. Hamilton, parazitler ile konakları arasındaki dur durak bilmez rekabetin, tam da cinselliğin büyük bir yarar sunabileceği, durmadan değişen cinsten bir arka plan yarattığını hızla fark etmişti.

Neden ebeveynlerinizden farklı olarsınız ki? Çünkü ebeveynleriniz muhtemelen içerden parazitler tarafından kimi zaman kelimenin tam anlamıyla lime lime ediliyordur, hatta siz doğarken bile. Avrupa ya da Kuzey Amerika'nın steril koşullarında yaşayacak kadar şanslı olanlar parazit istilasının dehşetini unutmüş olabilirler, ama dünyanın geri kalanı o kadar şanslı değildir. Uyku hastalığı, sıtma ve nehir körlüğü (onkoserkoz) gibi hasta-

lıklar, parazitlerin yol açtığı sefaletin boyutlarını aydınlatır. Dünya çapında en az iki milyar insan, şu veya bu tür bir parazit taşımaktadır. Hepimizin bu gibi hastalıklara kurban gitme ihtimali, yırtıcılara, aşırı zorlu hava koşullarına ya da açlığa kurban gitme ihtimalinden daha fazladır. Daha da genel olarak bakıldığında, tropikal hayvanlar ve bitkilerin aynı anda yirmi kadar farklı türde parazite ev sahipliği yapmaları olağandışı bir durum değildir.

Cinselliğin yardımı olur, çünkü parazitler hızla evrilirler; ömürleri kısadır, nüfusları çoktur. Konaklarına en hassas moleküler ölçekte, protein proteine, gen gene kendilerini uyarlamaları uzun sürmez. Bunu yapamamaları hayatlarına mal olur, başarı onlara gelişme ve kopyalama özgürlüğü verir. Eğer konak popülasyon genetik olarak aynıysa (klonlardan oluşuyorsa), başarılı parazit bütün popülasyonu ele geçirebilir, hatta ortadan kaldıracaktır. Ama konaklar kendi aralarında farklılık gösteriyorlarsa, bazı bireylerin parazite dirençli çıkabilecek ender rastlanan bir genotipe sahip olma şansı, hatta olasılığı vardır. Parazit dikkatini bu yeni genotipe yöneltmek zorunda kalıncaya ya da neslinin tükenmesi ihtimaliyle karşı karşıya kalıncaya dek bu bireyler serpilip gelişecektir. İşler böyle devam eder gider, kuşaklar ardından kuşaklar gelir, genotip üzerine genotip gelir, tıpkı Kırmızı Kraliçe gibi sonsuza dek koşulur ve hiçbir yere varılmaz. Yani cinsellik, parazitleri uzak tutmak için vardır.⁶

Ya da bu kuram böyle der. Nüfusun hayli fazla olduğu bolluk ortamları parazit kaynar, buralarda cinselliğin fazlasıyla bol olduğu kesinlikle doğrudur; cinselliğin bu koşullar altında yavru bireye olası bir yarar sunduğu da aynı ölçüde doğrudur. Ama hal böyle olsa da, parazitlerin oluşturduğu tehdidin cinselliğin evrimi ve yaygınlığını açıklayacak kadar ciddi olup olmadığı yönünde kuşkular vardır. Kırmızı Kraliçe'nin öngördüğü türden, dur durak bilmez bir genotip dönüşümü vahşi ortamda kolayca tespit edilmez, cinselliği teşvik eden koşulları sınamak amacıyla tasarlanmış bilgisayar modelleri de Hamilton'ın baştaki keskin kavrayışından çok daha sınırlı bir tablo sunmaktadır.

Örneğin, Kırmızı Kraliçe varsayımının öncülerinden Curtis

Lively 1994'te, bilgisayar simülasyonlarının "parazitlerin ancak parazit aktarım olasılıkları yüksek (%70'ten fazla) ve parazitlerin konağın uygunluğu üzerindeki etkileri dehşet verici boyuttaysa (%80'den fazla uygunluk kaybı) cinsellik için belirleyici bir yarar yarattıklarını" kabul etti. Bu koşullar birkaç durum açısından hiç kuşkusuz geçerliyse de, çoğu parazit enfeksiyonu cinselliğin yararlı olmasını sağlayacak kadar ağır değildir. Mutasyonlar, klonların da zaman içinde genetik olarak farklılaşabileceği anlamına gelir, bilgisayar modelleri de farklı klonların eşeyli organizmalardan daha iyi durumda olacağını göstermektedir. Çeşitli dahiyane düzeltmeler Kırmızı Kraliçe varsayımını daha güçlendirmiştir, ama istisnalara dikkat çeken argümanları da yan yatırmıştır. 1990'ların ortalarında gelindiğinde bu alanda belirgin bir umutsuzluk, tek başına hiçbir kuramın cinselliğin evrimini ve devamını açıklayamayacağı hissi gizlenemez bir hal almıştı.



Elbette ki sadece bir tek kuramın cinselliği açıklaması gerektiğini söylememize neden olacak hiçbir şey yoktur. Kuramların hiçbiri birbirini karşılıklı dışlamaz; matematiksel bir bakış açısıyla karmaşık bir çözüm olsa da, doğa istediği kadar karmaşık olabilir. 1990'ların ortalarından itibaren, araştırmacılar bir şekilde birbirlerini güçlendirip güçlendirmediklerini görmek için kuramları birleştirmeye başladılar; güçlendiriyorlardı. Örneğin, Kırmızı Kraliçe'nin yatağını kiminle paylaştığı önemlidir, bazı eşlerle o kadar etkili değildir. Curtis Lively, Kırmızı Kraliçe ve Müller çarkı bir arada değerlendirildiğinde, cinselliğin getirisinin arttığını, her iki fikrin de genel olarak kabul edilebilir hale geldiğini göstermiştir. Ama araştırmacılar karatahtanın başına dönüp farklı parametreleri yeniden gözden geçirdiklerinde, içlerinden birinin kesinlikle yanlış ve gerçek dünyaya uyamayacak kadar matematiksel olduğu ortaya çıktı: popülasyonun sonsuz büyüklükte varsayılması. Çoğu popülasyon sonsuz olmaktan uzaktır, bunun da ötesinde çok geniş popülasyonlar bile coğrafi bir yapıya sahiptir, sonlu olduğu kesin, kısmen yalıtılmış birim-

lere ayrılabilirler. Bu da şaşırtıcı bir farklılık yaratır.

Bütün bunlar arasında herhalde en fazla şaşkınlık yaratan şey de tam olarak neyi değiştirdiği idi. Popülasyon genetiğiyle ilgili, 1930'larda Fisher ve Müller'e uzanan eski fikirler, ders kitaplarındaki istirahatgahlarının ölümcül kovuklarında dirilip cinselliğin her yerdeliğini açıklayacak tek ümitvar kuram haline geldi. 1960'lardan sonra birkaç araştırmacı (özellikle William Hill, Alan Robertson ve Joe Felsenstein) Fisher'ın fikirlerini geliştirmiş olsalar da, gerçekten de işleri tersine çeviren British Columbia Üniversitesi'nden Sarah Otto ile Edinburgh Üniversitesi'nden Nick Barton'ın ilham verici matematiksel yaklaşımları oldu. Geçen on yıl içinde onların çıkardığı modeller cinselliği, popülasyonlar kadar bireylerin yararı açısından da açıklamayı başardı. Bu yeni çerçeve, Williams'ın ikramiye kuramından Kırmızı Kraliçe'ye kadar başka kuramları da hoş bir biçimde birleştirmektedir.

Yeni fikirler sonlu nüfuslarda şans ve seçilimin etkileşimine dayanır. Sonsuz popülasyonlarda, olabilecek her şey olacaktır. Genlerin ideal kombinasyonu kaçınılmaz olarak ortaya çıkacak, bunun gerçekleşmesi muhtemelen çok uzun sürmeyecektir. Oysa sonlu popülasyonlarda durum çok farklıdır. Çünkü rekombinasyon olmazsa, bir kromozomdaki genler bir ipin üzerindeki boncuklar gibi birbirlerine bağlanır. Kromozomun kadere tek tek genlerin niteliği yerine, gen topluluğuna, üzerine dizildikleri ipin tamamına bağlı olur. Çoğu mutasyon zararlıdır, ama aslında iyi bir kromozomu batıracak kadar da kötü değildir. Bu da mutasyonların birikebilecekleri, uygunluğu tedricen baltalayabilecekleri ve sonunda zayıf bir kromozom geçmişine yol açabilecekleri anlamına gelir. Mutasyonların, nadiren sakat bırakacak ya da öldürecek kadar ciddi olan damla damla akışı genetik kuvveti baltalar ve ortalamayı algılayamayacak şekilde aşağı çeker.

Ironiktir, bu ikinci sınıf kromozom geçmişiyile birlikte düşünüldüğünde, yararlı mutasyonların yıkıma uğradığı görülür. Sırf argümanın hatırına, bir kromozomda 500 gen bulunduğunu var-

sayalım. Olabilecek iki şey vardır. Yararlı mutasyonun yayılması, ya kromozomda tuttuğu ikinci sınıf bir kromozom sakini tarafından geciktirilecektir ya da geciktirilmeyecektir. İlk durumda, bir gen için güçlü olumlu seçim, diğer 499 gene karşı zayıf seçimle boşa harcanır. Genel etki nötrdür, yararlı mutasyonun yeniden kaybedilmesi ihtimali yüksektir, çünkü kromozom bir bütün olarak doğal seçim tarafından pek görülebilir değildir. Başka bir deyişle, aynı kromozom üzerinde genler arasındaki seçici girişim denilen girişim, değerli mutasyonların yararını gölgeler ve seçilimi engeller.

Ama ikinci alternatifin de bir tür şeytani aldatmacası mevcuttur. Bir kromozomun bir popülasyona dağılmış 50 varyantı olduğunu düşünelim. Bütün popülasyona yayılacak kadar yararlı yeni bir mutasyonun, aynı genin diğer bütün varyantlarının yerini alması gerekir. Sorun şudur ki, bu mutasyon aynı genin başka bütün varyantlarını yerinden etmekle kalmaz, gölgede kalmış rakiplerde aynı kromozomdaki bütün genlerin başka bütün varyantlarını da yerinden eder. Yeni mutasyon bu 50 kromozomdan birinde gerçekleşirse, diğer 49 kromozom popülasyondan silinip gidecektir. Aslında durum bundan da beterdir, çünkü bu prensip sadece aynı kromozomda fiziksel olarak bağlı genler açısından değil, klonlanmış bir organizmada aynı kaderi paylaşan bütün genler, başka bir deyişle bütün genler açısından geçerlidir. Feci bir şekilde, pratikte bütün genetik çeşitlilik kaybolup gider.

O halde genel olarak değerlendirildiğinde, “kötü” mutasyonlar “iyi” kromozomları felakete uğratar, “iyi” mutasyonlarsa “kötü” kromozomlara yapışır kalır, her iki durumda da uygunluk kaybı olur. Bir mutasyonun büyük bir fark yarattığı ender durumlarda, güçlü seçilimin genetik çeşitlilik üzerinde feci bir etkisi vardır. Bunun sonucu erkeklerde bulunan, hiç rekombinasyon yapmayan dejenere Y kromozomunda canlı bir şekilde görülebilir.⁷ Dişi X kromozomunun (o rekombine olur, çünkü kadınların iki tane X kromozomu vardır) bir gölgesi olan Y kromozomunun kesik bir kütükten öte bir hali yoktur, geride bir avuç geni kalmış, onlar da genetik saçmalama dizileriyle karış-

miştir. Bütün kromozomlar bu kadar dejenere olsaydı, hiçbir karmaşık hayat biçimi mümkün olamazdı.

Şeytani aldatmaca burada da son bulmaz. Seçilim ne kadar güçlüyse, genlerin biri ya da diğeri için seçici bir süpürme olması ihtimali o kadar yüksektir. Parazitler, iklim, açlık ya da yeni yaşam ortamlarına dağılım olsun, burada herhangi bir güçlü seçici iş görür, bu yüzden Kırmızı Kraliçe ile başka cinsellik kuramları arasında bir bağ vardır. Her durumda ortaya çıkan sonuç, genetik çeşitliliğin kaybıdır, bu da popülasyonun asıl boyutunu azaltır. Genel olarak bakıldığında, büyük popülasyonlar büyük bir genetik çeşitlilik içerir ve büyük genetik çeşitlilik içeren popülasyonlar büyür. Klonlanarak üreyen popülasyonlar, her seçici temizlikte genetik çeşitliliklerini yitireceklerdir. Popülasyon genetiğinin bakış açısıyla, büyük popülasyonlar (milyonlarla ifade edilenler) sanki küçüklermiş (binlerle ifade ediliyormuş) gibi davranırlar; bu da rastgele şansa kapıyı aralar. Bu yüzden de ağır seçim devasa popülasyonları bile “etkin” büyüklükte küçük bir popülasyona çevirir, onları dejenerasyon ve tükenmeye duyarlı kılar. Bir dizi araştırma tam olarak bu tür bir genetik yoksulluğun sadece klonlanarak üreyen türlerde değil, nadiren seks yapan türlerde de yaygın olduğunu göstermiştir. Cinselliğin büyük avantajı, iyi genlerin genetik geçmişlerinde bulunan çöpten uzakta rekombine olmasını mümkün kılması, aynı zamanda popülasyonlarda gizli genetik değişkenliğin büyük bölümünü de korumasıdır.

Barton ile Otto'nun matematiksel modelleri, genler arasındaki “seçici girişim”in sadece popülasyonlar değil, bireyler açısından da geçerli olduğunu gösterir. Hem eşeyli hem klonlanarak üreyen organizmalarda, tek bir gen cinsellik miktarını belirleyebilir. Böyle bir cinsellik geninin yaygınlığındaki değişim, zaman içinde cinselliğin başarısını gösterir. Yaygınlık artarsa, cinsellik kazanır, azalırsa klonlama kazanır. Kritik önemde bir nokta da şudur, böyle bir genin yaygınlığı bir kuşaktan diğerine artarsa cinsellik bireylere yararlı oluyor demektir. Ve de artar. Bu bölümde tartıştığımız bütün fikirler arasında, seçici girişim

en yaygın olarak geçerli olabilecek fikirdir. Cinsellik neredeyse bütün koşullarda klonlamadan daha iyi işler (iki yönlü bedeline rağmen). Popülasyonun son derece değişken, mutasyon hızının yüksek, seçim baskısının güçlü olduğu durumlar, farkın en fazla olduğu durumlardır. Kutsal olmayan bu üçlü, kuramı cinselliğin kökeniyle dikkat çekici derecede ilgili hale getirir.



Biyoloji alanındaki en iyi zihinlerin bazıları cinsellik sorunuyla boğuşmuşlardır, ama sadece tedbirsiz bir azınlık cinselliğin derindeki kökenleri hakkında spekülasyonlarda bulunmaya meyletmiştir. Cinselliğin ne tür bir varlıkta ya da ortamda evrildiğiyle ilgili birçok belirsizlik vardır, bu yüzden de herhangi bir spekülasyonun spekülasyon olarak kalması gerekir. Böyle bile olsa, hâlâ şiddetle devam eden tartışmalara rağmen bu alanda çoğu kişinin en fazla hemfikir olduğunu düşündüğüm iki ifade vardır.

İlki, bütün ökaryotların ortak atasının seks yaptığıdır. Bu demek oluyor ki bitkiler, hayvanlar, algler, mantarlar ve protistlerin ortak özelliklerini yeniden değerlendirdiğimizde, hepsinde ortak olduğunu gördüğümüz başlıca özelliklerden biri cinsellik-tir. Ökaryotlarda cinselliğin bu kadar temel bir önemde olması aydınlatıcıdır. Hepimiz, eşeysiz bir bakteriden türemiş eşeyli bir atadan türemişsek, sadece eşeyli ökaryotların geçebileceği bir darboğaz olsa gerektir. Çok muhtemeldir ki ilk ökaryotlar, bakteriyel ataları gibi eşeysizdi (hiçbir bakteri gerçekten seks yapmaz) ama hepsi de tükenip gitmiştir.

Herkesin hemfikir olacağını düşündüğüm ikinci noktaysa mitokondrilerle, ökaryotların “enerji santralleri”yle ilgilidir. Mitokondrilerin bir zamanlar serbest yaşayan bakteriler olduğu konusunda artık hiçbir anlaşmazlık yoktur, bugünkü ökaryotların ortak atasının da mitokondrileri olduğu neredeyse kesin görünmektedir. Mitokondrilerden konak hücreye yüzlerce genin aktarıldığına, neredeyse bütün ökaryotların genomlarını süsleyen “sıçrayan genler”in mitokondrilerden türediğine de hiç kuşku yoktur. Bu gözlemlerin hiçbirisi özellikle tartışmalı değildir,

ama bir araya getirildiklerinde cinselliğin doğmasına yol açmış olması gereken seçim baskılarının çarpıcı bir tablosunu gözler önüne sererler.⁸

Bir düşünün: İlk ökaryot hücre, büyük bir konak hücrenin içinde yaşayan küçücük bakterileri olan bir kimeraydı. İçselleştirilmiş bakterilerden biri öldüğünde genleri serbest kalıyor, konak hücrenin kromozomlarının üstüne yağıyordu. Bu genlerin parçacıkları, bakterilerde genlerin dahil edilmesine yönelik standart yollarla rastgele konağın kromozomuna dahil oluyorlardı. Bu yeni genlerin bazıları değerliydi, diğerlerinin hiçbir yararı yoktu, birkaçı da zaten mevcut genlerin kopyalarıydı. Ama bazıları konağın kendi genlerinin içine yerleşen birer darbeydi, bu genleri parçalara ayırıyorlardı. Sıçrayan genler felakete sebep oluyordu. Konak hücrenin onların yayılmasını önlemesinin hiçbir yolu yoktu, bu yüzden de hiçbir cezayla karşılaşmaksızın genomda oradan oraya sıçırıyor, kendilerini genlere kabul ettiriyor, konağın dairesel kromozomunu, bugün biz ökaryotlarda ortak olan çok sayıda düz kromozoma ayırıyorlardı. (bkz. Dördüncü Bölüm.)

Bu, hızla evrilen son derece değişken bir popülasyondur. Basit mutasyonlar hücrenin duvarına mal oldu. Bazıları bakterinin hücre iskeletini daha dinamik ökaryot hücre iskeleti versiyonuna uyarlıyorlardı. Konak hücre, bakteriyel misafirlerinden lipid sentezine yönelik genleri düzensizce transfer ederek bir çekirdek ve iç zarlar oluşturmuş olabilirdi. Bu değişikliklerin hiçbirisi, bilinmeyene doğru umutlu bir sıçrama yapmayı gerektirmez, bütün bu adımlar basit gen transferleri ve küçük mutasyonlarla evrilebilir. Ama değişikliklerin neredeyse hepsi zararlıdır. Her yarar için bin tane hatalı adım vardır. Sizi öldürmeyen bir kromozom yapmanın, en iyi yenilikleri ve genleri tek bir hücrede bir araya getirmenin tek yolu seks. Tümüyle seks. Öyle yarım ağız bir gen değiş tokuşu değil. Sadece seks bir hücrenin çekirdek zarıyla, bir başka hücrenin dinamik hücre iskeletini ya da bir başka hücrenin protein hedefleme mekanizmasını bir araya getirebilir ve aynı zamanda bütün başarısızlıkları eleyebilir. Mayoz bölünmenin rastgeleleştirme gücü, bin tanede bir kazanan (ha-

yatta kalan daha uygun bir terim aslında) çıkarabilir, ama klonlamadan çok çok daha iyidir. Değişken bir popülasyon, yüksek bir mutasyon hızı ve (kısmen asalak sıçrayan genlerin oluşturduğu büyük engelin yarattığı) ağır bir seçim baskısı yüzünden klonların akıbeti fenadır. Hepimizin seks yapmasına şaşmamak gerek. Cinsellik olmasaydı biz ökaryotlar hiç olmayabilirdik.

Mesele şudur: Klonların akıbeti fenaysa, cinsellik günü kurtaracak kadar hızlı evrilmiş olabilir mi? Cevap herhalde şaşırtıcı bir "evet"tir! Mekanik bağlamda konuşacak olursak, cinsellik hayli kolay bir biçimde evrilmiş olabilir. Esas itibarıyla cinselliğin üç veçhesi vardır: hücrelerin kaynaşması, kromozomların ayrılması ve rekombinasyon. Her birine çabucak bir göz atalım.

Hücre kaynaşması az çok bakterilerde engellenir, çünkü hücre duvarı araya girer. Ama duvar ortadan kalkarsa, sorun birleşmeden kaçınmak haline gelebilir. Balçık küfleri ve mantarlar gibi birçok basit ökaryot birleşerek çok sayıda çekirdeği olan devasa hücreler oluşturur. *Syncytium* denilen gevşek hücre ağları, ilkel ökaryot hayat döngüsünün bir parçası olarak düzenli olarak oluşur. Sıçrayan genler gibi parazitler ve bu arada mitokondriler hücrelerin kaynaşmasından kârlı çıkar, böylece yeni konaklara ulaşabilirler. Bunların birkaçının hücre birleşmesini başlattığı gösterilmiştir. Bu bağlamda belki de zorlu problem, hücre birleşmesini önleyecek yolların evrilmesiydi. Yani cinselliğin ilk önkoşulunun, hücre kaynaşmasının bir sorun olmadığı neredeyse kesindi.

İlk bakışta, ayrılma daha zorlayıcıymış gibi görünüyor. Mayoz bölünmenin kromozomların incelikli bir dansı olduğunu, hiç beklenmedik bir biçimde kromozom sayısının iki katına çıkmasıyla birlikte başladığını, bundan sonra dört yavru hücreden her birine bir küme düşecek şekilde bölündüğünü hatırlayalım. İşler neden bu kadar karışıktır? Aslına bakarsanız, o kadar da karışık değildir. Mayoz bölünme, yine kromozom sayısının iki katına çıkmasıyla başlayan mevcut hücre bölünmesi yöntemindeki, mitoz bölünmedeki bir değişiklikten öteye geçmez. Oxfordlu biyolog Tom Cavalier-Smith'in ifade ettiği üzere, mitoz

bölünme muhtemelen normal bakteriyel hücre bölünmesindeki adımların gayet basit bir biçimde peş peşe gelmesi yoluyla evrilmiştir. Cavalier-Smith, mitoz bölünmeyi mayoz bölünmeye çevirmek için sadece bir tek kilit değişikliğinin gerekli olduğunu işaret eder: kromozomları bir arada tutan “zamlık”ın (teknik olarak kohezin proteinlerinin) tamamını sindirememek. Yeni bir hücre kopyalama turuna girip kromozomları yeniden kopyalamak yerine, hücre bir süre durur ve kromozomları ayırarak işe devam eder. Aslında artık zamlık, hücrenin kafasının karışmasına ve daha birinci turu bitirmeden bir sonraki kromozom ayırma turunun vaktinin geldiğini düşünmesine neden olur.

Sonuçta kromozom sayısında bir azalma olur, Cavalier-Smith bunun aslında mayoz bölünmenin başlıca yararı olduğuna işaret eder. İlk ökaryot hücreler birleşip çok sayıda kromozomun bulunduğu ağırlar haline gelmenin (bugün balçık küflerinde olduğu gibi) önüne geçemiyorduyorsa, bu durumda tek bir kromozom kümesi olan basit hücreler üretmek için bir tür azaltıcı hücre bölünmesi zorunlu olurdu. Mayoz bölünme, standart hücre bölünmesi yöntemini zamlıklayarak tek tek hücrelerin yeniden üretilmesini sağlamıştır. Mevcut bir hücre bölünme mekanizmasında asgari düzeyde karışıklık yaratarak bunu yapmıştır.

Elbette ki ayrılma mayoz bölünmenin sadece bir parçasıdır, bu da bizi son parçaya, rekombinasyona getiriyor. Rekombine olmanın evrilmesi de bir sorun çıkarmaz, çünkü gerekli bütün mekanizma bakterilerde mevcuttur ve basitçe kalıtımla miras alınmıştır. Sadece mekanizma değil, rekombinasyon yöntemi de bakteriler ve ökaryotlarda tıpatıp birbirinin aynısıdır. Bakteriler rutin olarak (yatay gen transferi denilen bir süreçle) çevreden gen alırlar ve bunları rekombinasyonla kendi kromozomlarıyla birleştirirler. İlk ökaryotlarda mitokondriden yağan bakteri genlerinin kromozomla birleştirilmesinin, böylece genom boyutlarının sürekli genişlemesinin ardında aynı mekanizma olsa gerek. Başka bir deyişle, ilk ökaryotlarda rekombinasyonun yararı muhtemelen, bakterilerde olduğu gibi gen yüklemeydi. Ama mayoz bölünmede rekombinasyon mekanizmasının daha genel bir

rol üstlenmesi için bastırmak, hiç kuşku yok ki bir formaliteydi.

İşte bu yüzden, cinselliğin evrilmesi muhtemelen zor olmamıştı. Mekanik açıdan bakıldığında, evrilmeye yazgılıydı. Biyologlar açısından daha derin paradoks, cinselliğin sürmüş olmasıdır. Doğal seçim “en uygun olanın hayatta kalması”yla ilgili değildir, çünkü uygun olan üreyemezse, hayatta kalmanın hiçbir önemi olmaz. Cinsellik başlangıçta klonlanarak üremeye büyük avans vermiştir, ama neredeyse bütün ökaryotlar arasında baskın olmuştur. Cinselliğin en başta sunduğu yarar muhtemelen bugün sunduğundan farklı değildi: En iyi gen kombinasyonlarının aynı bireyde bir araya gelmesi, zararlı mutasyonların engellenmesi ve değerli yeniliklerin bünnyeye dahil edilmesi. Cinselliğin ürettiği yavru sayısı yarı yarıya az olabilir, ama nihayetinde bu yavrular iki kat daha uygundurlar. Cinsellik olmasaydı gezegenimizde hayat bodur kalır, dejenere olurdu. Cinsellikle hayat hazlarla dolmuştur.

İroniktir, bu fikirlerin tarihi yirminci yüzyılın başlarına uzanır, gözden düşmüş eski fikirler, daha gözde kuramlar yarı yolda kaldıkça daha sofistike bir kılıkla yeniden doğmuşlardır. Cinselliği bireylere yararı bakımından açıklarlar, ama aynı zamanda cinselliğe uygun düşecek bir biçimde eski kuramları da içerirler; hatalı yönlere giden fikirler elenir, verimli fikirler tek bir kuramda birleştirilir, tıpkı bir kromozomda rekombine olan genler gibi. Çünkü fikirler de en iyi biçimde cinsellik sayesinde evrilir, bundan da hepimiz yararlanırız.

VI

Hareket

Güç ve Görkem



“**D**oğa; dişleri ve pençeleri kızıl,” İngilizce’de Darwin’ atıf-
la en fazla alıntılanan sözlerden biri olsa gerek. Yine de
bu cümle doğal seçilimin kendisini olmasa bile özünü, bu du-
rumda en azından popüler algılanma biçimini yansıtır. Bu dize,
Tennyson’ın 1850’de, Darwin’in *Türlerin Kökeni*’ni yayınlama-
sından dokuz yıl önce tamamladığı *In Memoriam* adlı şiirinden
alınmıştır. Şiir, Tennyson’ın dostu şair Arthur Hallam’ın ölümü
üzerine kaleme alınmıştı, bağlamı da Tanrı’nın sevgisi ile doğa-
nın kesin kayıtsızlığı arasındaki son derece kasvetli tezattı. Tenn-
yson Doğa’ya, sadece bireylerin değil, türlerin de silinip gittiğini
söyletiyordu: “Binlerce tür gelip geçti: Umrumda değil hiçbir,
hepsi gidecek!” Bizim durumumuzda “hepsi”, aziz tuttuğumuz
her şeyin örtülü ifadesidir: amaçlar, sevgi, hakikat, adalet, Tanrı.
Tennyson inancını pek kaybetmemiş olsa da, zaman zaman şüp-
heler içinde harap olmuştu.

Daha sonraları doğal seçilimin öğretici tekerlerine atfedilen,
doğayla ilgili bu katı bakış açısına birçok yönden saldırılar yönel-
tilmiştir. Lafzen alındığında bu fikir otoburları, bitkileri, algleri,
mantarları, bakterileri vs. görmezden gelir, hayatın tamamını
avcı ile av arasındaki canlı mücadeleye indirger. Metafor olarak,
Darwin’in savunduğu daha genel varoluş mücadelesi anlamına

çekildiğinde, bireyler ile türler, hatta bireydeki genler arasındaki işbirliğinin önemini küçümseme eğilimi gösterir. Burada işbirliği üzerinde durmak istemiyorum, daha çok bu düzeyi lafzen ele almak, yırtıcılığın önemini, özellikle de enerjiye bağlı hareketin, yani kendiliğinden hareketin yaşadığımız dünyayı uzun zaman önce nasıl değiştirdiğini değerlendirmek niyetindeyim.

“Dişleri ve pençeleri kıvı” dizesi hareketi ima eder. Önce avınızı yakalarsınız, genellikle hiç de edilgin bir takip olmaz bu. Ama sonra çenelerin kenetlenmesi, bir ağzın kuvvetle açıp kapamanmasını gerektirir: Kaslara ihtiyaç vardır. Pençeler de gadarlıkla, kasların enerjisiyle kullanılmıyorlarsa, parçalamaları epeyce zordur. Avcılığın edilgin bir biçimini tahayyül etmeye çalıştığımızda, mantara benzer bir şey düşünebiliriz; ama o zaman bile bir tür hareket gereklidir, emici hiflerin yavaş yavaş boğması bile olsa. Yine de asıl vurgulamak istediğim şey şu: Kendiliğinden hareket olmasaydı, bir yaşam biçimi olarak avcılık zor hayal edilebilirdi. O halde daha da derinde yatan icat, kendiliğinden harekettir. Avları yakalayıp yiyebilmeniz için sürünen, kuşatan minik bir amip gibi olsun, bir çitanın gücü, hızı ve zarafetiyle olsun, önce hareket etmeyi öğrenmeniz gerekir.

Kendiliğinden hareket, gerçekten de dünya üzerindeki hayatı, ekosistemlerin karmaşıklığından tutun bitkiler arasında evrimin hızı ve yönüne varıncaya kadar hemen fark edilemeyecek bir biçimde değiştirmiştir. Türler arasındaki etkileşim ağlarıyla, bunların zaman içinde değişme biçimiyle ilgili kusurlu olsa da bir fikir veren fosil kayıtları bu hikayeyi yalanlar. İlginçtir, fosil kayıtları, sanıldığı üzere 250 milyon yıl önce Permian Çağı'nın sonunda türlerin %95'nin ortadan kaybolmasının, gezegenimizin tarihindeki en büyük kitlesel tükenişin ardından, karmaşıklığın birdenbire değiştiğini işaret eder. Bu büyük tükenişin her şeyi silip süpürmesi sonrasında hiçbir şey eskisi gibi olmamıştır.

Dünya, Permian öncesinde de yeterince karmaşıktı tabii. Karada devasa ağaçlar, eğreltiotları, akrepler, yusufçuklar, amfibiler, sürüngenler bulunuyordu. Denizler trilobitler, balıklar, köpekbalıkları, ammonitler, dallı bacaklılar, denizzambakları (Per-

miyen tükenişinde neredeyse tümüyle ortadan kaybolan saplı denizlaleleri) ve mercanlarla doluydu. Üstünkörü bir araştırma, bu “tipler”in değiştiğini, ama ekosistemlerin çok da farklı olmadığını söyleyebilir; ama ayrıntılı bir envanter aksini ortaya koyar.

Bir ekosistemin karmaşıklığı türlerin görelî sayısıyla tahmin edilebilir: Ekosisteme bir avuç tür hakimse, geri kalanlar marjinal bir varlık gösteriyorsa, bu ekosistemin basit olduğu söylenir. Ama çok sayıda tür, benzer sayılarda bir arada yaşıyorsa, ekosistem çok daha karmaşıktır, türler arasında çok daha geniş bir etkileşim ağı vardır. Fosil kayıtlarına göre belli bir dönemde bir arada yaşayan türlerin sayısını toplayarak bir karmaşıklık “endeksi” elde edilebilir, sonuçlar biraz şaşırtıcıdır. Zaman içinde karmaşıklığın tedricen birikmesi yerine, Permiyen tükenişi sonrasında ani bir vites değişikliği olmuş gibi görünmektedir. Tükeniş öncesinde, yaklaşık 300 milyon yıl önce deniz ekosistemlerinde basit ve karmaşık sistemlerin payı yarı yarıyaydı; tükeniş sonrasında karmaşık sistemlerin ağırlığı üçe bir artmış, 250 milyon yıl boyunca bugüne kadar değişmeyen istikrarlı ve sürekli bir değişim söz konusu olmuştur. Yani tedrici bir değişim yerine ani bir değişiklik yaşanmıştır. Peki ama neden?

Chicago’da Doğa Tarihi Saha Müzesi’nde paleontolog olarak görev yapan Peter Wagner’a göre cevap, kendiliğinden hareket eden organizmaların yayılmasıdır. Bu değişiklik okyanusları büyük ölçüde bulduğu yerden kıpırdıyamayan bir dünya (kıt ve düşük enerjiyle yaşayan dallı bacaklılar, denizzambakları vs.) olmaktan çıkarıp, salyangozlar, deniz kestaneleri ve yengeçler gibi milim milim bile olsa etrafta hareket eden hayvanların baskın olduğu yeni, daha faal bir dünyaya çevirmiştir. Elbette ki tükeniş öncesinde de etrafta hareket eden bir sürü hayvan vardı, ama ancak tükenişten sonra baskın hale geldiler. Permiyen kitlesel tükenişi sonrasında neden böyle bir vites değişikliği olduğu bilinmemektedir, ama muhtemelen hareketli bir hayat tarzının dış dünyaya karşı daha korunaklı olmasıyla ilgili olabilir; hareket ediyorsanız, genellikle hızla değişen çevrelerle karşılaşsınız, bu yüzden de daha büyük bir fiziksel esneklik ve dayanıklılığa

ihtiyaç duyarsınız. Yani daha hareketli hayvanlar, felakete eşlik eden büyük çevresel değişikliklerden sağ çıkmalarını sağlayacak avantajlara sahip olmuş olabilirler (bu konudan sekizinci bölümde daha ayrıntılı bahsedeceğiz). Süzerek beslenen türlerin kendilerini böyle bir darbeye karşı koruyacak bir şeyleri yoktu, o yüzden de akıbetleri felaket oldu.

Sebepler ne olursa olsun, hareket eden canlıların Permiyen tükenişi sonrasındaki yükselişi hayatı yeniden yapılandırmıştır. Hareket etmek, hayvanların birbirlerine çok daha sık rastlaması, hem de birbirleriyle çok daha sık kapışması anlamına geliyordu, bu da türler arasında daha büyük bir olası etkileşimler yelpazesini mümkün kılıyordu: Sadece avcılığa değil, otlamaya, leşçiliğe, tüneller açmaya da daha sık rastlanır olmuştu. Hareket etmek için her zaman iyi sebepler olmuştu, ama kendiliğinden hareketin getirdiği yeni hayat tarzları hayvanlara belli bir zamanda, belli bir yerde olmak, hatta farklı bir zamanda, farklı bir yerde olmak için sebepler veriyordu; yani onlara amaç veriyordu, kasti, amaçlı davranışlar gösterme imkanı kazandırıyordu.

Ama kendiliğinden hareketin ödülleri hayat tarzının ötesine geçer, çünkü hareketlilik evrim hızını, evrimsel zaman içinde genlerin ve türlerin değişme hızını da belirlemiştir. Bütün türler arasında en hızlı evrilenler, bağışıklık sisteminin sonu gelmez bir biçimde yenilikçi ve sadist işkenceleriyle uğraşmak zorunda olan parazitler ve patojenik bakteriler olurken, hayvanlar da evrilme hızında neredeyse onlara yaklaşmıştır. Oysa tersine, süzerek beslenenler, genel olarak da bitkiler bulundukları yere bağlı olduklarından, o kadar hızlı evrilmezler. En azından rakiplerine nazaran aynı yerde kalmak için koşması gereken Kırmızı Kraliçe fikri, hareketsiz süzerek beslenenlerin dünyasına neredeyse yabancıdır. Bu da çağlar boyunca esasen değişmeden kalmalarına, sonra da bir darbede silinip gitmelerine neden olmuştur. Ama bu kuralın, yine de bir istisnası vardır ki o da aslında hareketliliğin önemini vurgular: çiçekli bitkiler.

Permiyen tükenişi öncesinde herhangi bir çiçekli bitkiye rastlamak mümkün değildi, bitki dünyasına tekdüze bir yeşil

hakimdi, bugünün kozalaklı ormanları gibi. Çiçekler ve meyvelerde renklerin patlaması, hayvanlar dünyasına verilmiş bir cevaptı. Çiçekler elbette ki polen taşıyıcıları, hareketli hayvanları çekmek için tasarlanmıştı, bu hayvanlar polenleri bir bitkiden diğerine taşır, yere bağlı bitkiler için cinselliğin yararlarını artırır. Meyveler de tohumlarını yaymak için hayvanlar dünyasının hareketliliğini ve bağırsaklarını davet eder. Böylece çiçekli bitkiler hayvanlarla birlikte, karşılıklı bağımlılık içinde evrilmiştir; bitkiler polen taşıyıcıların ve meyve yiyicilerin derin açlıklarını tatmin etmiş, hayvanlarsa bitkilerin sessiz taktiklerine körce boyun eğmiştir, en azından biz insanlar tohumusuz meyveler üretmeye başlayıncaya kadar. Kaderlerinin bu biçimde iç içe geçmesi çiçekli bitkilerin evrim hızını, hayvan ortaklarınıninkine yaklaştıracak kadar hızlandırmıştır.

Kendiliğinden hareket, hızla değişen çevrelerle baş etmeyi, bitkiler ile hayvanlar arasında daha fazla etkileşim olmasını, avcılık gibi yeni hayat tarzlarını ve daha karmaşık ekosistemleri beraberinde getirmiştir. Bütün bu etkenler sadece hayvanlar arasında değil, birçok bitki için de ayak uydurabilmek için duyuların daha iyi gelişmesini (çevreleyen dünyanın daha iyi biçimlerde “denenmesi”ni) ve evrimin daha hızlanmasını teşvik etmiştir. Bütün bu yeniliklerin kalbinde, hepsini mümkün kılan tek bir icat yatmaktadır: kas. Göz gibi organların uyandırdığı mükemmellik hissini uyandırmasa da, mikroskopla bakıldığında kasların muhteşem derecede amaçlı görünen, güç uygulamak için uyumla hareket eden bir lif yelpazesi olduğu görülür. Kaslar kimyasal enerjiyi mekanik güce çeviren makinelerdir, Leonardo’nun icatları kadar büyüleyici bir icattır bu. Ama böyle amaçlı bir makine nasıl ortaya çıkmıştır? Bu bölümde hayvanların dünyayı tepeden turnağa değiştirmesini sağlayan kas kasılmasını yönlendiren moleküler mekanizmanın kökenini ve evrimini inceleyeceğiz.



Pek az özellik kaslar kadar etkileyicidir, Achilles’den tutun şu Kaliforniya Valisi’ne kadar kaslı bir erkek de ya şehvet ya haset

uyandırmıştır. Ama görünüm her şey değildir. Buna paralel bir tarihte, kasların aslında nasıl çalıştığı sorusuyla boğuşan büyük düşünürler ve deneycilerin bazılarıyla karşılaşırız. Aristoteles'ten Descartes'a kadar, kasların, kaslıların egosu misali kasılmaktan çok şiştikleri fikri hakimdi. Göze görünmeyen, ağırlığı olmayan birtakım hayvan ruhları beynin kıvrımlarından çıkıp içi boş sinirlerden geçerek kaslara ulaşıyor, şiştiklerinde onları kısıltıyordu. Descartes, bedene ilişkin mekanik bakış açısıyla, kaslarda tıpkı kan damarlarında olduğu gibi, hayvani ruhların geri akmasını önleyen minicik vanalar olduğunu ileri sürmüştü.

Descartes'ın ardından çok geçmeden, 1600'lerde tek bir bulgu uzun zamandır el üstünde tutulan bu fikirleri altüst etti: Hollandalı deneyci Jan Swammerdam, kas hacminin kasılma sırasında artmadığını, aksine biraz düştüğünü gösterdi. Hacmi azalıyorsa, kas, safra kesesi gibi hayvani ruhlarla doluyor olamazdı. Bundan kısa bir süre sonra da 1670'lerde bir başka Hollandalı, mikroskobinin öncüsü Antony van Leeuwenhoek muhteşem cam merceklerini ilk kez kullandı, etin mikroskobik yapısını anlamaya çalışıyordu. İnce liflerin, birlikte bir zincir, oluşturan "birbirine bağlanmış çok küçük kürecikler"den oluştuğunu betimledi; bu küreciklerden yapıma binlerce zincir etin yapısını oluşturuyordu. İngiliz William Croone, bu küreciklerin mikroskobik kesecikler gibi hareket edebileceğini, ille de kasın genel hacmini değiştirmeksizin şeklini şişkin hale getirebileceğini düşündü. Bütün bunların fiilen nasıl gerçekleştiği sorusu, o tarihte deneysel doğrulamanın ötesinde yatıyordu belki, ama hayal gücünün değil. Önde gelen birkaç bilim insanı, keselerin dolmasının kelimenin tam anlamıyla patlamayla olduğunu ileri sürdü. Örneğin John Mayow hayvani ruhların "nitro-havasal parçacıklar" olduğunu iddia etti. Mayow, nitro-havasal parçacıkların sinirlerden geldiğini, kandan gelen sülfür parçacıklarıyla birleşerek barutunkine benzer bir patlama oluşturduğunu söylüyordu.

Bu gibi fikirler uzun ömürlü olamadı. Leeuwenhoek ilk gözlemlerinden sekiz yıl sonra "kürecikleri" yeni, gelişmiş bir mercek ile gözleyip özür diledi: Et lifleri, minicik keseciklerden

oluşan uzun diziler değildi, düzenli “halkalar ve kıvrımlar”ın kestiği liflerdi, kürecik izlenimi uyandıran da bu yivlerdi. Dahası, lifleri ezen ve içeriğini merceklerle inceleyen Leeuwenhoek bunların da daha küçük lifçiklerle dolu olduğunu, her lifte yüz kadar lifçik bulunduğunu fark etmişti. Terminoloji değişir, ama Leeuwenhoek’in tanımladığı bölümler bugün “sarkomer” olarak bilinir, içlerindeki lifçiklerse “miyofibril.” Açıkladı ki kasların kasılmasının keseciklerin şişmesiyle hiçbir ilgisi yoktu, her şey liflerle ve daha fazla lifle ilgiliydi.

Hal böyleyken, bilim insanları kaslardaki motor liflerin bir şekilde birbirlerinin üzerine “kayabileceği”ni ileri sürmüş olsalar da hangi kuvvetin kasları hareket ettirmeye zorladığını bilmiyorlardı. Bütün bu lifleri hareket ettirebileceği düşünülen yeni bir güç ortaya çıkıncaya kadar yaklaşık bir yüzyıl geçti. O güç elektirikti.

1780’lerde Bologna Üniversitesi’nde anatomi profesörü olan Luigi Galvani, bir kurbağanın bacak kasına, odadaki elektirikli bir makineden bir kıvılcım çıktığı sırada cerrah bıçağıyla dokununca kasın şiddetle kasılması karşısında hayrete kapılmıştı, çünkü kurbağa ölüydü. Bir kesim sırasında, cerrah bıçağının pirinç tutamağını fırçalaması ve şimşeklerin çıktığı bir kasırga da dahil başka birçok durum, benzer bir tepkiye neden olmuştu. Elektirik sayesinde hareketlenme fikrine çok geçmeden galvanizm adı verilmiş, Mary Shelley bu fikirden etkilemişti. Shelley, 1823’te gotik romanı *Frankenstein*’i yazmadan önce Galvani’nin raporlarını incelemişti. Aslında Galvani’nin yeğeni Giovanni Aldini’den de biraz ilham almıştı. On dokuzuncu yüzyılın başında “ölülerin galvanik olarak yeniden hareketlendirilmesi” gösterisi için Avrupa’yı dolaşan Aldini, İngiltere’de Kraliyet Cerrahlar Koleji’nde cerrahlar, doktorlar, dukler, hatta Galler Prensi’nin de dahil olduğu bir topluluğun önünde yaptığı meşhur bir gösteride, bir caninin kesilmiş kafasına elektirik vermişti. Aldini, elektirikli çubukların ağız ve kulaklara uygulanmasıyla ilgili şu yorumda bulunmuştu: “Çene titremeye başladı, onlara bitişik kaslar korkunç bir şekilde çarpıldı ve sağ göz açıldı.”

Pavia Üniversitesi'nde çalışan fizikçi Alessandro Volta da Galvani'nin bulgularından etkilenmişti, ama kasılmanın nedeni konusunda onunla aynı fikirde değildi. Volta, bedende elektrikle ilgili bir şey olmadığında ısrar ediyordu: Galvanizm, metallerin yarattığı dışsal elektrik yüklerine verilmiş bir tepkiden ibaretti. Volta, bacağın da tıpkı tuzlu su gibi elektriği iletebileceğini savunuyordu, edilgin bir nitelikti bu. Galvani ile Volta on yıl kadar sürecektir bir kavgaya tutuştular, tutkulu yandaşları da tam İtalyan tarzı, ikiye ayrıldı: Animalistlere karşı metalistler, fizyologlara karşı fizikçiler, Bologna'ya karşı Pavia.

Galvani bu "hayvani elektriğin" gerçekten içerden geldiğine emindi, ama kanıtlamakta, en azından Volta'yı tatmin edecek bir kanıt göstermekte zorlanıyordu. Bu tartışma, şüpheliğin gücünün deneysel düşüncenin uyarılmasında oynadığı role verilebilecek çok hoş bir örnektir. Galvani, savını kanıtlayacak deneyler geliştirirken, kasın içten harekete geçirilebilir olduğunu, kendi tabiriyle, uyarıcıyla oransız bir tepki üretebileceğini gösterdi. Kasların, iç yüzeylerde eksi ve artı yükler biriktirerek, kendi içlerinde de elektrik üretebileceğini ileri sürdü. Akımın iki yüzey arasında açılan gözenerden geçtiğini söylüyordu.

Bunlar hayal ürünüydü, ama maalesef Galvani'nin başına gelenler, bilimde bile, galip gelenin tarihi yazmaktaki gücünü gösteriyordu.² Orduları o sırada İtalya'yı işgal etmekte olan Napoleon'a bağlılık yemini etmeye yanaşmayan Galvani, Bologna Üniversitesi'ndeki görevinden atıldı, ertesi yıl da yoksulluk içinde öldü. Fikirleri yıllar boyunca sönmek kaldı, kendisi de uzunca bir süre boyunca ancak okült hayvani güçler tellalı ve Volta'nın karşıtı olarak hatırlandı. Volta ise 1810'da Napoleon tarafından Lombardiya Kontu ilan edildi, sonra da adı bir elektrik birimine verildi. Volta'nın ismi ilk pili, Volta pilini icat etmiş olması sebebiyle bilim tarihinde öne çıkmış olsa da, hayvansal elektrik konusunda kesinlikle yanılıyordu.

Galvani'nin fikirleri on dokuzuncu yüzyılın sonlarına doğru, en başta da Alman biyofizik araştırma ekolü tarafından ciddiye alınmaya başladı, bu ekolün en meşhur ismi büyük Hermann

von Helmholtz'du. Bu ekol kaslar ve sinirlerin gücünü gerçekten de "hayvansal" elektirikten aldığını kanıtlamakla kalmadı, Helmholtz ordunun havadaki güllerinin hızını belirlemek için geliştirdiği bir yöntemi kullanarak, bir elektirik itkisinin bir sinire ulaşma hızını bile hesapladı. Sinirsel aktarımın tuhaf bir biçimde yavaş olduğu anlaşıldı; saniyede elli-altmış metreydi, oysa normal elektirik aktarımı saniyede yüzlerce kilometreyi buluyordu. Bu da hayvansal elektirikte bir şeylerin farklı olduğunu düşündürüyordu. Çok geçmeden bu farklılık, söğüt süpürgesi misali, elektronların akıcı değişimleri yerine, potasyum, sodyum ve kalsiyum gibi yüklü atomların (iyonların) hantal hareketlerine bağlandı. İyonların bir zar üzerinden geçmesi bir depolarizasyon dalgasına, yani daha eksi bir yüke doğru savrulmaya neden olur. Bu da yakındaki bir zarı etkiler ve sinirde ya da kasta bir "aksiyon potansiyeli" olarak akar.

Peki bir aksiyon potansiyeli kasların kasılmasını tam olarak nasıl sağlıyordu? Bunu cevaplayabilmek, temeldeki daha büyük sorunun, kasların fiziksel olarak nasıl kasıldığı sorusunun cevaplanmasını gerektiriyordu. Mikroskobideki ilerlemeler kas liflerindeki tutarlı grupları ortaya çıkararak bir cevabı işaret etti, bu lif gruplarının farklı yoğunluklardaki maddelere teka-bül ettiği düşünülüyordu. İngiliz cerrah ve anatomist William Bowman 1830'ların sonundan itibaren insanlar ve başka memeliler, kuşlar, sürüngenler, amfibiler, balıklar, kabuklular ve böcekler dahil 40'ı aşkın türün mikroskobik iskeletsel kas yapısına ilişkin ayrıntılı bir çalışma yürüttü. Bütün kaslar, 160 yıl önce Leeuwenhoek'in betimlediği şeritler halinde parçalardan, yani sarkomerlerden oluşuyordu. Ama Bowman her sarkomerde koyu ve açık renkli başka şeritler olduğunu fark etmişti. Kasılma sırasında sarkomerler kısalıyor, daha açık renkli şeritleri silerek Bowman'ın "koyu bir kasılma dalgası" dediği şeye yol açıyordu. Bowman haklı olarak, "kasılabilme tek tek parçalarda bulunan bir özelliktir," sonucuna varmıştı (Şekil 6.1).

Gelgelelim Bowman bunun dışında kendi bulgularında geri adım atmıştı. Kasın içindeki sinirlerin sarkomerlerle doğrudan



Şekil 6.1 İskelet kasının yapısı; tipik çizgiler ve şeritler görülüyor. Tek bir sarkomer bir siyah çizgiden (Z diski) diğerine uzanır. Bir sarkomer içinde en koyu bölgeler (A şeritleri) aktine bağlı miyozin içerir; açık renk bölgeler (I şeritleri) aktin içerir; ara grilerse M çizgisine bağlı miyozin lifleri içerir. Kas kasıldığında, I şeridindeki aktin, miyozin köprüleriyle M çizgisine çekilir, böylece sarkomer kısalır ve "koyu renk bir kasılma dalgası" ortaya çıkar (I şeridi A şeridince kapsanır).

bir etkileşim içinde olmadığını görebiliyordu, bu yüzden elektiriksel bir harekete geçmenin en azından dolaylı olması gerekiyordu. Daha da kötüsü, sfinkter (büzücü kaslar) ve arterlerde bulunan düz kaslarla ilgili kaygıları vardı. Bu kaslar, iskelet kasları gibi bir araya gelip sarılmıyordu, ama gayet güzel kasılıyordu. Bunun sonucunda Bowman, şeritlerin kasların kasılmasıyla pek ilgisi olmadığını, kasılabilmenin sırrının moleküllerin görünmez yapısında yattığını düşündü, moleküllerin yapısının da ebediyen "anlayışın erişemeyeceği uzaklıkta" kalacağı kanısındaydı. Moleküler yapı konusunda haklıydı, ama şeritler, hatta anlayışın menzili konusunda yanılıyordu. Bowman'ın kas yapısı hakkındaki çekincelerini hemen herkes paylaşıyordu.

Victoria dönemi insanları bir anlamda hem her şeyi biliyorlar, hem de hiçbir şey bilmiyorlardı. Kasların, her biri bölümlere, yani sarkomerlere ayrılmış binlerce liften oluştuğunu, bu sarkomerlerin kasılmanın temel birimi olduğunu biliyorlardı. Sarkomerlerin bantlar oluşturduğunu, bunların farklı yoğunluklarda malzemeye tekabül ettiğini biliyorlardı. Bazı bilim insanları en azından bu bantların birbirinin üzerine kayan filamentlerden oluştuğundan kuşkulanıyordu. Kas kasılmalarının elektiriksel olduğunu, elektirigin iç yüzeylerde potansiyel bir farklılık olarak üretildiğini de biliyorlardı, hatta kalsiyumun başlıca şüpheli olduğunu bile tespit etmişlerdi. Kastaki başlıca proteini yalıtmışlar, buna "miyozin"

demoşlerdi. (Yunanca "kas" anlamına gelen sözcükten türetilmişti bu isim.) Ama derinlerde yatan, Bowman'ın anlayışın eremeyeceğini ileri sürdüğü molekül sırları hiç kuşkusuz Victoria dönemi insanların ulaşabileceklerinin ötesindeydi. Bileşenler hakkında bir şeyler biliyorlardı, ama bileşenlerin nasıl bir araya geldiğine, hepsinin nasıl işlediğine dair hiçbir şey bilmiyorlardı. Bu gibi kavrayışlar, yirminci yüzyıl biliminin virtüözce, indirgemeci yaklaşımlarını bekliyordu. Kasın hakiki görkemini takdir edebilmek, bileşenlerin nasıl evrildiğini anlayabilmek için Victoria dönemi insanların geride bırakıp moleküllere bakmamız gerekiyor.



Cambridge, 1950; Cavendish Laboratuvarı'nın yeni kurulmuş yapısal biyoloji birimi; bilim tarihi açısından yeniliklere gebe bir an. İki fizikçi ve iki kimyager yirminci yüzyılın ikinci yarısında biyolojiyi dönüştürecek bir teknolojiyle uğraşiyor: X-ışını kristalografisi. Tekrarlanan geometrik kristallere odaklandığında yeterince zor olan bu teknoloji, bugün bile küresel biyolojik moleküllere uygulandığında karanlık bir matematiksel sanattır.

Ekibin başkanı Max Perutz'du. O ve yardımcısı John Kendrew, hemoglobin ve miyoglobin gibi büyük proteinlerin yapısını belirleyen ilk bilim insanları olmuşlardı; üstelik de bunu belirlerken hareket noktaları, bir X ışını huzmesi bu proteinlerin yılankavi atom zincirleri tarafından dağıtıldığında ortaya çıkan örüntülerden başka bir şey değildi.³ Francis Crick kısa süre sonra genç Amerikalı James Watson'la birlikte aynı tekniği DNA'nın yapısına uygulayacaktı. Ama 1950'lerde dördüncü kişi Watson değil, nispeten tanınmamış, en azından dış dünyanın pek tanımadığı bir kişilik, bu ekibin Nobel Ödülü almayan tek üyesiydi. Ama Hugh Huxley'nin kesinlikle bu ödülü alması gerekirdi, çünkü kasların nasıl çalıştığını molekül manivelalar ve kaldıraçlar düzeyinde herkesten fazla gösteren o olmuştu, başarıları da yarım yüzyıla yayılmıştı. Kraliyet Cemiyeti onu en azından 1997'de en büyük ödülleri olan Copley Madalyası'yla ödüllendirdi. Bu satırları yazdığım sırada, Huxley Massachusetts'te Brandeis Üniversitesi'nde

Emeritus Profesör, 83 yaşında hâlâ yayın yapıyor.

Huxley'nin o kadar ünlü olmaması kısmen, kendisinden daha ünlü olan Nobel ödüllü Andrew Huxley'le, Darwin'in "bul-doğu", çok kuvvetli bir belagat yeteneği olan T. H. Huxley'nin torunuyla karıştırılmasından ileri gelse gerektir. Andrew Huxley, ismini II. Dünya Savaşı sonrasında sinirlerin iletkenliği üzerine yaptığı çalışmalarla duyurmuş, daha sonra 1950'lerin başında ilgisini kaslara yöneltmiş, sonraki yıllarda o da kas araştırmaları alanında başlıca kişiliklerden biri haline gelmişti. Birbirlerinden bağımsız olarak çalışan Huxleyler (hiçbir akrabalıkları yoktu) aynı sonuca varmışlar, sonuçlarını 1954'te *Nature* dergisinde tam sayı yayınlamışlardı. Her ikisi de filamentlerin kayması kuramı olarak bilinen kuramı ileri sürüyordu. Özellikle Hugh Huxley X-ışını kristalografisi ve elektron mikroskopisi gibi son derece güçlü teknikleri öne sürmüştü (o sırada sadece 20 yaşındaydı). Bu tekniklerin olabilecek bileşimlerin en iyisi olduğu anlaşılabilecek, bu sayede kasların nasıl işlediği sonraki yıllarda giderek daha ayrıntılı bir biçimde gözler önüne serilecekti.

Hugh Huxley savaş yıllarını radar üzerinde çalışarak geçirdi. Daha sonra doktora eğitimini tamamlamak için Cambridge'e geri dönen Huxley, onun kuşağından birçok fizikçi gibi atom bombasının dehşeti yüzünden kendisini fiziği terk etmek, dikkatini ahlaken ve duygusal olarak daha az yüklü bir şeye yöneltmek zorunda hissetmişti. Fiziğin kaybı biyolojinin kazancı oldu. 1948'de Perutz'un küçük grubuna katılan Huxley, biyologların kasların yapısı ve işleyişi hakkında ne kadar az şey bildiğine hayret ederek, işleri yoluna koymak için ömür boyu sürececek bir çaba içine girdi. Kendisinden önce Galvani'nin yaptığı gibi kurbağa bacakları üzerinde çalışan Huxley'nin ilk bulguları hayal kırıklığı yaratacak nitelikteydi. Ama sonra yabani kurbağaların daha iyi sonuç verdiğini gördü, böylece kahvaltısı öncesi kurbağa yakalamak için bataklıklarda uzun ve ürpertici bisiklet turları başladı. Bu yabani kurbağalar ayrıntılar bakımından zengin, ama anlam bakımından muğlak X-ışını örüntüleri yaratıyordu. Ironiktir, Huxley 1952'de doktora sınavında kristalografinin öncülerinden Dorothy

Hodgkin'in karşısına çıktı. Tezini okuduğunda, Hodgkin bu verilerden filamentlerin kayıyor olabileceği fikrine atladı ve bu fikri heyecanla merdivenlerde rastladığı Francis Crick'le tartıştı. Ama Huxley gençliğin heyecanı ve haklı olarak, Hodgkin'in yöntemler bölümünü gereği gibi titizlikle okumadığını, elde ettiği verilerin onun vardığı sonucu desteklemediğini savundu. Huxley iki yıl sonra elektron mikroskobundan elde edilen görüntülerin yardımıyla sonunda kendisi de Hodgkin'le benzer bir sonuca vardı, ama artık elinde uygun deneysel destekler vardı.

Huxley henüz olgunlaşmamış sonuçlara atlamayı reddetmiş, filamentlerin kayması kuramını iki yıl ertelemiş olsa da, X-ışını kristalografisinin elektron mikroskobisiyle bileşiminin kasların kasılmasının moleküler ayrıntılarını ortaya serme gücüne sahip olduğu yönündeki ilk inancında haklıydı. Her iki yöntem de kusurluydu. Huxley'nin sözleriyle, "elektron mikroskobisi gerçekten somut görüntüler veriyor, ama her tür ıvır zıvırla, X-ışını kırınımıysa gerçek bir veri sağlıyor, ama muammayı andırır biçimde". Onun bu kavrayışının kaynağında, bir tekniğin kusurlarının bir diğerinin kuvvetli yönleriyle kapatılabileceği değerlendirilmesi yatıyordu.

Huxley şanslıydı da, çünkü hiç kimse, sonraki yarım asır içinde, özellikle X-ışını kristalografisinde kaydedilecek dikkat çekici ilerlemeleri öngöremezdi. Burada zorluk, huzmenin yoğunluğunda yatıyordu. X-ışınlarının bir yapıdan kırılarak geçmesi yoluyla gözlenebilir bir örüntü ortaya çıkarmak çok sayıda huzme gerektirir. Bu da ya zaman alır (1950'lerde bu saatler, hatta günler alıyor, Huxley ve diğerleri gece boyu oturup zayıf X-ışını kaynaklarını soğutmakla uğraşıyordu) ya da bir anda yoğun bir X-ışını huzmesi yaratabilecek güçte, aşırı derecede yoğun bir kaynak gerektiriyordu. Biyologlar bir kez daha fizikteki gelişmelerin eline bakıyordu, özellikle de sinkotronun geliştirilmesine dayanıyorlardı. Bu geniş, dairesel atom altı parçacık hızlandırıcıları, senkronize manyetik ve elektirik alanları kullanarak protonlar ya da elektronları astronomik hızlara çıkarıyor, sonra onları çarpıştırıyordu. Biyologlar için sinkotronun değeri,

fizikçiler için rahatsız edici bir yan etkide yatıyordu. Parçacıklar sınırlanmış daireler içinde elektirik yüklenirken elektromanyetik ışınım, yani büyük bölümü X-ışını tayfında "sinkotron ışığı" salıyordu. Bu muhteşem derecede yoğun huzmeler, saniyenin küçücük bir bölümünde kırınım örüntüleri oluşturuyordu; bunlar 1950'lerde yaratması saatler, günler alan örüntülerdi. Kritik önemdeydi bu, çünkü kas kasılması sürecindeki olaylar bir saniyenin yüzlerce biri kadar bir süre içinde gerçekleşiyordu. Kasların kasılması sırasında gerçekleşen moleküler değişikliklerin gerçek zamanlı incelenmesi, ancak sinkotron ışığının kullanılmasıyla mümkündü.

Huxley filamentlerin kayması kuramını ilk ileri sürdüğünde, bu kaçınılmaz olarak biraz yetersiz verilere dayanan bir varsayımdı. Ama o tarihten bu yana, aynı tekniklerin geliştirilmiş biçimlerinin kullanılmasıyla, ayrıntılı mekanik tahminlerin birçoğu, Huxley ve diğer bilim insanları tarafından kanıtlanmış, bir saniyenin küçük bir kesitinde atomik çözünürlükte ölçülmüştü. Victoria dönemi insanların biraz büyük mikroskopik yapılar gördüğü yerde, Huxley ayrıntılı moleküler örüntüler çıkarabiliyor, böylece bir mekanizma ileri sürebiliyordu; bugün geride kalan birkaç belirsizliğe rağmen, kasların nasıl kasıldığını neredeyse atom atom biliyoruz.

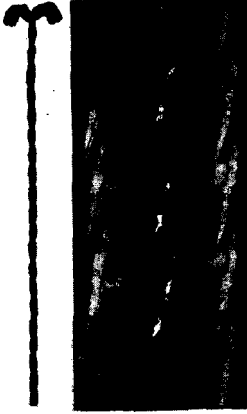


Kasların kasılması iki molekülün özelliklerine dayanır: aktin ve miyozin. İkisi de uzun lifler (polimerler) halinde tekrarlayan protein birimlerinden oluşur. Kalın lifler, Victoria döneminde adı konulan miyozinden oluşur, ince liflerse aktinden. Biri kalın biri ince bu iki filament, yan yana bant demetleri halinde bulunur, küçük dikey köprülerle birbirlerine bağlanmışlardır. (Bunları ilk kez Huxley 1950'lerde elektron mikroskobu kullanarak göstermişti.) Bu köprüler sert ve hareketsiz değildir, sallanırlar, her sallanışlarında da aktin filamentlerini biraz ileri iterler, uzun bir gemideki mürettebatın kürek çekerek gemilerini suda yüzdürmeleri gibi. Uzun Viking gemilerine benzerliğin ötesine ge-

çen başka şeyler de söz konusudur. Çünkü kürekler düzensizce çekilir, tek bir komuta uymaya yanaşmaz. Elektron mikroskobisi, binlerce köprü içinde yarısından azının birlik içinde kürek çektiğini göstermektedir; çoğunluğun küreklerinin genellikle uyumsuzca çekildiği görülmüştür. Ama hesaplamalar bu küçük değişikliklerin, uyumsuzca işliyor olsa bile, birlikte, kasların kasılmasının toplam kuvvetini açıklamaya yetecek güçte olduğunu göstermiştir.

Bütün bu ileri geri salınan, kürek çeken köprüler kalın filamentten çıkar, miyozin alt birimlerinin bir parçasıdır. Moleküler ölçekte değerlendirildiğinde, miyozin devasadır, hemoglobin gibi ortalama bir proteinden sekiz kat daha büyüktür. Genel şekil açısından bakıldığında, bir miyozin birimi sperme benzer; aslında başları birbirine kenetlenmiş, kuyrukları donmuş bir kucaklamayla birbirine sarılmış iki sperme. Bu kuyruklar, bitişik miyozin moleküllerinin kuyruklarıyla iç içe geçerek zikzaklı bir yelpaze ortaya çıkarır, bir sicimin telleri gibi birlikte ağır filamentleri oluştururlar. Başlar peş peşe bu ipten sarkar, aktin filamentiyle etkileşime giren, salınan köprüleri oluşturan da bunlardır (Şekil 6.2).

Salınan köprüler şöyle işler: Önce bir köprü aktin filamentine bağlanır, bağlanır bağlanmaz da ATP bağlar. ATP bütün süreci yürütmek için gerekli enerjiyi sağlar. ATP bağlanır bağlanmaz, köprü ince filamentten ayrılır. Serbest kalan köprü, yine aktin filamentine bağlanmadan önce (esnek bir "boyun" bölgesiyle) yaklaşık 70 derecelik açıyla salınır. O bunu yaparken, ATP'nin kullanılan parçacıkları salınır, köprü de salınarak ilk yapısına geri döner, sonrasında bütün ince filamenti kaldırır. Bu döngü (sal, sallan, bağla, sürük) bir kürek çekme hareketine eşdeğerdir, her seferinde ince filament bir milimetrenin birkaç milyonda biri kadar hareket ettirir. ATP kritik önemdedir. O olmazsa, baş aktinden ayrılamaz ve sallanamaz; sonuç katılaşmadır, ölüm katılaşmasında olduğu gibi, ölümden sonra ATP olmadığı için kaslar sertleşir. (Bu katılaşma bir-iki gün sonra, kas dokusunun bozulmaya başlamasıyla birlikte ortadan kaybolur.)



Şekil 6.2: David Goodsell'in enfes suluboya çalışmasıyla miyozin. Solda: Yukarıda iki başı ve birbirine dolanmış kuyruklarıyla tek bir miyozin molekülü. Sağda: Kalın bir miyozin lifi; başları çıkıntı yaparak her iki tarafta aktinle etkileşime geçmiş, kuyruklarsa bir halat gibi birbirine dolanarak kalın lifi oluşturmuş.

Birçok farklı tipte köprü vardır, hepsi de genel olarak birbirine benzer, ama hızları bakımından farklıdır. Birlikte binlerce mensubu olan bir "süperail" oluştururlar; sadece insanlarda 40 farklı tipte köprü vardır. Kasılmanın hızı ve kuvveti miyozinin hızına bağlıdır, hızlı bir miyozin ATP'yi hızla parçalar, kasılma döngüsünü de çabucak başlatır. Her bireyde çok sayıda kas tipi bulunur, her tipin de kendisine özgü bir kasılma hızı olan, kendisine özgü bir miyozini vardır.⁴ Türler arasında da benzer farklılıklar mevcuttur. Bütün miyozinlerin en hızlısı, meyve sineği *Drosophila* gibi böceklerin uçuş kaslarında bulunur, saniyede birkaç yüz kez gibi bir hızla döngüyü tamamlar; bu miyozin, memelilerin çoğunda olduğundan on kat daha hızlıdır neredeyse. Genel bir kural olarak, küçük hayvanların miyozinleri daha hızlıdır, bir farenin kasları insan kasından üç kat daha hızlı bir biçimde kasılır, bir sıçanın kaslarıysa iki kat daha hızlı. En yavaş miyozinler, tembel hayvanlar ve kaplumbağaların acı verecek kadar yavaş kaslarında bulunur. Bu hayvanlarda miyozinin ATP'yi kırma hızı, insanda olduğundan yirmi kat daha yavaştır.

Bir kasın kasılma hızını miyozinin ATP tüketme hızı belirlese de, ATP'nin eksilmesi asla kas kasılmasının son bulması anlamına gelmez. Öyle olsaydı, jimnastik çalışmalarımızı ölüm katlaşması benzeri bir katılma içinde bitirirdik, her seferinde de eve sedyelerde taşınmamız gerekirdi. Aslında, kas yorgunluğu

katılaşmayı önleme amaçlı bir uyarlanmadır. Kas kasılmasının başlangıcı ve sonu hücre içindeki kalsiyum düzeyine bağlıdır, kas kasılmasıyla Galvani'nin hayvansal elektirliği arasındaki bağlantıyı da bu oluşturur. Bir itki ulaştığında, hücreye kalsiyum iyonları salan bir tüpçükler ağı üzerinden hızla yayılır. Burada bizi ilgilendirmeyen birtakım adımlar sonucu kalsiyum nihayetinde aktin filamentinde köprülerin bağlandığı yerleri açar ve bu da kasın kasılmasını sağlar. Ama kas hücresine kalsiyum akar akmaz, kapılar kapatılır ve pompalar harekete geçer, bütün kalsiyumu yeniden boşaltarak bir sonraki çağrıya hazırlanmaya başlar. Kalsiyum düzeyi gerilerken, aktin filamenti üzerindeki bağlanma yerleri yeniden kapanır, köprüler artık bağlanamaz, kasılma sona ermek zorundadır. Sarkomerlerin doğal esnekliği, kısa süre içinde baştaki rahat hallerine dönmelerini sağlar.



Bu elbette, son derece sadeleştirilmiş bir anlatıdır, işleyen kısımlar neredeyse absürd bir minimuma indirilmiştir. Herhangi bir ders kitabına başvurduğunuzda, sayfalar dolusu ayrıntıyla, her biri incelikli bir yapısal ya da düzenleyici role sahip bir sürü proteinle karşılaşsınız. Kas biyokimyası bir hayli karmaşıktır, ama temel bir yalınlığı mevcuttur. Bu yalınlık sadece kendi kendine keşfedip öğrenmeyi sağlayacak bir aygıt değildir, karmaşık sistemlerin evrimi açısından merkezî önemdedir. Farklı dokular ve türlerde, miyozinin aktine bağlanmasını kontrol etmenin birçok yolu vardır. Bütün bu biyokimyasal ayrıntılar, barok bir kilisenin rokoko süslemelerini andırır; bütün bunlar sayesinde her kilise kendi başına bir başyapıt olabilirse de, hepsi de hâlâ barok kilisedir. Aynı şekilde, kasların işleyişinde bütün rokoko farklılıklarına rağmen, miyozin her zaman aktinle, aynı yerden bağlanır ve ATP de her zaman filamentlerin kaymasına enerji sağlar.

Örneğin, sfinkterler ve arterleri büzüştürme becerisine sahip düz kaslar, William Bowman ile Victoria dönemi bilim insanlarının kafasını karıştırmıştı. Düz kaslar iskelet kaslarındaki şeritlerden tamamen yoksundur, ama yine de kasılmak için aktin ve

miyozine bağlıdır; filamentler çok daha gevşek bir biçimde düzenlenmiştir, herhangi bir mikroskobik düzeni kabul etmezler. Burada aktin ve miyozin arasındaki etkileşimler de basitleşmiştir. İskelet kaslarında izlenen dolambaçlı yolun tersine, bir kalsiyum akışı miyozinlerin başlarını doğrudan harekete geçirir. Ama başka bakımlardan, düz kasın kasılması iskelet kaslarının kasılmasına benzer. Her iki durumda da kasılma miyozinin aktine bağlanması, aynı ATP'den güç alıp aynı döngüyü başlatması sayesinde gerçekleşir.

Bu göreli yalınlık, düz kasların iskelet kaslarının evrimi yolunda atılmış bir adım olduğunu düşündürebilir. Düz kas, ince-likli bir mikroskobik yapıdan yoksun olmakla birlikte, gayet iyi işleyen, büzüşebilir bir dokudur. Ne var ki farklı türlerde kas proteinleriyle ilgili araştırmalar, kasların evriminin o kadar basit olmadığını göstermektedir. Genetikçi Satoshi Oota ile Naruya Saitou'nun Japonya'da Ulusal Genetik Enstitüsü'nde yaptığı titiz bir araştırma, memelilerin iskelet kas sistemlerindeki bir protein seçkisinin böceklerin çizgili uçuş kaslarındakilere benzer olduğunu, her ikisinin de omurgalılar ve omurgasızların 600 milyon yıl önce yaşamış ortak bir atasından evrilmiş olması gerektiğini göstermiştir. Bu ortak atanın bir iskeleti olmasa dahi, çizgili kasları olsa gerekti. Aynı şey büyük ölçüde düz kas proteinleri için de geçerlidir, onların da izleri sürüldüğünde benzer bir ortak ataya ulaşılıyordu. Düz kaslar, daha karmaşık çizgili kasların evriminde bir adım olmamıştı: O ayrı bir evrim çizgisinden geliyordu.

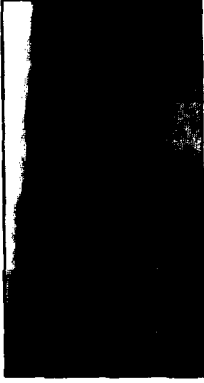
Dikkat çekici bir olgudur bu: İskelet kaslarındaki miyozin, başınızın üstünde uçup duran şu sinir bozucu kara sineğin uçuş kaslarındaki miyozine, mide bulantısı sırasında büzüşen sfinkterinizdeki kaslardaki miyozine olduğundan daha yakındır. Hayret vericidir ki bu ayrılık daha da ötelere uzanır, besbelli ki hem böcekler hem omurgalılarda ortak olan bedensel simetrinin kökeninden de önceye gider. Öyle görünüyor ki denizanasının da bizimkiyle ayrıntılı olarak karşılaştırılabilecek çizgili kasları vardır. Yani hem düz kaslar hem çizgili kaslar benzer bir aktin ve

miyozin sistemi kullanarak kasılırlar, ama belli ki her sistem her iki hücre tipini de taşıyan ortak bir atadan, birbirinden bağımsız olarak evrilmiştir; denizanasının yaratılışın zirvesini oluşturduğu zamanlarda, ilk hayvanlar arasında yer alan bir ortak atadan.

Ne var ki çizgili ve düz kasların beklenmedik uzun evrimsel ayrılıklarına karşın, miyozinin birçok biçiminin ortak bir atadan evrildiği açıktır: Hepsi de aynı temel yapıyı paylaşır, hepsi de aynı yerlerden aktine ve ATP'ye bağlanır, hepsi de aynı motor döngüyü başlatır. Hem çizgili hem düz kasların miyozinleri ortak bir atadan türemişse, bu atanın bir denizanasından daha ilkel olması, muhtemelen de ne çizgili ne düz kaslarının olması gerekir; yine de aktin ve miyozini kullanacak bir yer bulmuştur. Aktin ve miyozinler orada ne yapıyorlardı? Bu sorunun cevabı yeni değildir. Tarihi 1960'lara uzanır ve beklenmedik tek bir bulguya bağlanabilir. Ama bu eskiliğine rağmen, biyoloji alanında pek az bulgunun böyle görsel bir kuvveti olmuş, hem de kasın evrimiyile ilgili büyük bir açılım sağlamıştır. Hugh Huxley, aktinin miyozin başlarıyla "süslenebileceği"ni ve elektron mikroskobisiyle görülebileceğini bulmuştu. İzin vererseniz açıklayayım.

Çeşitli filamentlerin hepsi de kastan çıkarılıp bileşenlerine ayrılabilir. Örneğin, miyozin başları uzun kuyruklarından ayrılabilir ve bir deney tüpünün içinde aktinle birlikte yeniden yapılabilir. Aktin hızla uzun filamentler halinde yeniden toplanır; doğru koşullar sağlandığında, polimerleşme aktinin içkin bir özelliğidir. Sonra miyozin başları filamentlere bağlanır, kasın tamamı boyunca bunu yapar, filament boyunca küçük ok başları gibi dizilirler. Bütün bu ok başları aynı yöne bakar, bu durum aktin filamentlerinin kutuplaştığını gösterir. Aktin filamentleri her zaman tek bir yapı içinde toplanırlar, miyozin de her zaman aynı yönde bağlanır, böylece de kuvvet oluşur. (Sarkomerlerde, bu kutuplaşma orta noktada tersine çevrilmiştir, her iki ucu da ortaya çeker, böylece her sarkomeri bir birim olarak kasar. Sarkomerlerin peş peşe kasılması bir bütün olarak kası kısaltır.)

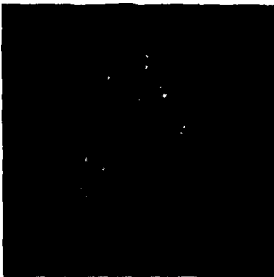
Küçük ok başları sadece ve sadece aktine bağlanır, böylece miyozin başlarının başka hücre tiplerine eklenmesi aktin fila-



Şekil 6.3 Balçık küfü *Physarum polycephalum*'dan alınmış aktin lifleri, tavşan kasından miyozin "ok başları"yla donanmış.

mentlerinin varlığını tespit etmeye yarayan bir test haline gelir. 1960'lara gelinceye kadar, herkes aktinin özel bir kas proteini olduğunu, hiç kuşkusuz farklı türlerin kaslarında bulunduğunu, ama başka hücre tiplerinde bulunmadığını varsayıyordu. Oysa hiç kası olmayan organizmalardan birinin, bira mayasının aktin içerebileceğini ileri süren biyokimyasal veriler bu genel kanıya meydan okuyordu. Aktini miyozin ok başlarıyla süsleme çözümü Pandora'nın kutusunu açtı. Kutuyu ilk açan Huxley olmuştu, tavşan miyozinini çok ilkel bir organizmadan, balçık küfünden alınan aktin filamentlerine ekleyerek aralarında tam bir uyum olduğunu gördü (Şekil 6.3).

Aktin her yeredir. Bütün karmaşık hücrelerde bir iç iskelet bulunur, hücre iskeleti aktinden ve başka filamentlerden oluşur (Şekil 6.4). Bizim vücudumuzdaki, ayrıca başka hayvanlar, bitkiler, mantarlar, algler ve protozoalardaki bütün hücrelerde aktinden oluşan bir hücre iskeleti bulunur. Tavşan miyozininin



Şekil 6.4 Bir inekten alınan kıkırdak hücresindeki aktin hücre iskeleti florasan boya phalloidin-FITC ile renklendirilmiş.

maya aktinine bağlanması, birbirinden kökten farklı tipte hücrelerde bulunan aktin filamentlerinin ayrıntılı yapıları itibarıyla birbirine çok benzer olduğu anlamına gelir. Bu varsayım kesinlikle doğrudur, böyle olması da şaşırtıcıdır; bira mayası ile insan aktininin gen dizilimlerinin yüzde 95 birbirinin aynısı olduğunu artık biliyoruz.⁵ Bu bakış açısıyla yaklaşıldığında, kasın evrimi çok farklı görünür. Kaslarınıza güç veren filamentler, bütün karmaşık hücrelerin mikroskobik dünyasına güç verir. Tek gerçek farklılık örgütlenmelerinde yatar.



Bir müzikal biçim olarak varyasyonlarda özellikle sevdiğim bir şey vardır. Anlatılanlara bakılırsa, Beethoven gençliğinde Mozart için çaldığında, Mozart onun doğaçlama yeteneği (basit bir temadan sonsuz sayıda ritmik ve melodik çeşitleme çıkarma becerisi) dışında çalışını pek etkileyici bulmaz. Sonraki yıllarda, bu becerinin zirve noktası muhteşem Diabelli Varyasyonları olur. Onlardan önceki Bach'ın muhteşem Goldberg Varyasyonları gibi, Beethoven'ın varyasyonları da biçimsel olarak katıdır: Temel armonik şema, eserin tamamı boyunca korunmuş, esere hemen tanınabilir bir birlik kazandırmıştır. Beethoven'dan sonra bu kesinlik genellikle sağlanamamış, bestecilerin ruh halleri ve izlenimler üzerinde durması mümkün olmuştur, ama matematiksel bir görkemden yoksun eserler ortaya çıkmıştır. Her gizli nüansın deşildiği, her gizli boyutun açığa çıkarıldığı, her olasılığın gerçekleştirildiği hissinden yoksun eserler.

Bir temayı alıp akla gelebilecek her çeşitlemeyi yapma, ama her zaman yapının temel taşlarını sıkı sıkıya bağlı kalma becerisinin biyolojide bir yansıması vardır. Belirli bir tema (örneğin miyozin ile aktin arasındaki motor etkileşimler) doğal seçilimin sonu gelmez hayal gücüyle çeşitlenerek nefes kesici bir biçim ve işlev yelpazesine ulaşır. Herhangi bir karmaşık hücrenin iç dünyası, kesin bir varyasyon ortaya çıkaran bu olağanüstü yapının bir tezahürüdür.

Motor proteinlerin hücre iskeletinin lifleriyle girdiği etkileşimler, karmaşık hücrelerin hem içindeki hem dışındaki hareket

dünyasının tamamından sorumludur. Birçok hücre katı bir yüzey üzerinde hareket ettirici uzuvları olmadan, kıvrılıp dönmeden, belirgin bir çaba sarf etmeksizin kayar. Başka bazı hücrelerin yalancı ayak denilen, dışarıya akarken hücreyi de sürükleyen ya da protoplazmik tuzaklarıyla avları çevreleyen çıkıntıları vardır. Bazılarının ise kirpik ya da kamçıları bulunur, bunların yılankavi ve ritmik bükülmeleri hücreyi hareket ettirir. Hücrenin içinde sitoplazma girdapları oluşturur, hücre içeriğini kesintisiz bir akıntıyla büyüterek dolaştırır. Hücrenin bu minik dünyasında mitokondriler gibi büyük nesneler ileri geri telaşla koşutur, kromozomlar danslarını tamamladıktan sonra kendi köşelerine çekilir. Bundan kısa bir süre sonra da hücre ikiye bölünür, kendisini vicdansız bir korseyle ortasından sıkar. Bütün hareket, molekül bir alet çantasına bağlıdır, aktin ve miyozin de bu çantanın örnek unsurlarıdır. Bunların hepsi de tek bir tema üzerine temaya sıkı sıkıya bağlı çeşitlemeler yapmaya dayanır.

Küçülüp bir ATP molekülü büyüklüğüne inerseniz, hücre geleceğe ait engin bir şehir manzarası sunar. Bütün yönlerde (yukarı ve aşağı, başka her yöne) göz alabildiğine uzanan kablolar vardır, bunlar başka kablolarla desteklenmiştir. Bazıları dayanıksız ve ince görünür, bazılarınınınsa çapları daha geniştir. Bu hücre metropolünde kütleçekim hiçbir şey ifade etmez, yarı akışkan olmaksızın her şeydir ve her şey atomların rastgele çarpışmasıyla ilgilidir. Hareket etmeye çalıştığınızda, sanki bala batmış gibi hareket edemediğinizi görürsünüz, ama her taraftan hem yumruklanır hem sarsılırsınız. Sonra birden, bu baş döndürücü kentin içinden tuhaf bir makine çıkar gelir, kablolardan birine asılmış inanılmaz bir hızla hareket etmektedir. Savrularak gelen bu makineye hantal bir aygıtla asılmış, hızla çekilen gerçekten de kocaman bir nesne vardır. Yolunun üstündeyseniz, uçan bir elektirik santrali çarpmış gibi olursunuz. Aslında bu gerçekten de uçan bir elektirik santralidir, kentin öbür tarafındaki önemli işlere güç vermeye giden bir mitokondridir. Sonra bir bakarsınız, başka nesnelerin kimi daha hızlı, kimi daha yavaş aynı yöne doğru ilerlediğini görürsünüz, ama hepsi de gökyüzündeki kablolar-

da benzer makinelerle çekilmektedir. Ve sonra güm! Mitokondri geçerken pervane rüzgarına kapılır, girdabın içine düşersiniz, artık bütün karmaşık hücrelerin içeriğini karıştıran daimi dolaşımın, sitoplazmik akışın bir parçası haline gelmişsinizdir.

Bu zar zor hayal edebileceğimiz bir inceliğin nanoteknolojisi-
dir, ama bu fütüristik kent manzarasında tüm tuhaflığına rağmen
tanıdık bir şeyler de vardır. Sizin kendi hücrelerinizden birinin
içini ya da bir bitki hücresinin, bir mantar hücresinin, bahçe-
nizdeki havuzda yüzen tek hücreli bir protozoonun hücresinin
içini de bu şekilde anlatabilirdim. Hücrenin dünyasında etraftaki
dünyayla derin bir bağlılık ve yoldaşlık hissi veren muhteşem
bir birlik vardır. Hücrenin bakış açısından, siz sadece beden pla-
nında bir varyasyonsunuz, benzer tuğlalarla muhteşem bir şey
inşa etmenin başka bir biçimisiniz. Ama ne tuğla! Bütün okar-
yotlarda (çekirdeği olan karmaşık hücrelerden yapılmış organiz-
malarda, bkz. dördüncü bölüm) ortak olan, koşuşturmacanın
hakim olduğu her metropol, bir bakterinin içindeki çok daha
basit dünyadan çok farklıdır. Bu farklılığın büyük bölümü de
hücre iskeletinin şevkli gayretinden ve hücre içeriğini ebediyen
taşıyan sürekli trafiğinden kaynaklanır. Bu kesintisiz trafik akı-
şı olmazsa, hücre metropolü, büyük kentlerimiz işlek caddeler
olmadan ne kadar mümkün olabilirse o kadar mümkün olurdu.

Hücrenin bütün trafiğini, geniş kapsamlı olarak bakıldığında
benzer bir şekilde işleyen protein motorları yürütür. Bunların ilki
miyozindir, miyozin aktin filamentlerini yukarı aşağı hareket ettirir,
tıpkı kasta yaptığı gibi. Ama işte bu noktada varyasyonlar baş-
lar. Kasta miyozin başları zamanlarının onda dokuzunu aktin fila-
mentlerinden ayrı geçirir; böyle yapmazlar, bağlı kalırlarsa başka
miyozin başlarının salınmalarını engellerler. İşler kürekçilerin kü-
rek çekmeyi reddettiği bir tekneye binmeye benzer. Kasta bu dü-
zenleme iyi işler, çünkü miyozin başları uzun kuyruklarıyla aktin
filamentlerine yakından bağlanmış, kalın filamentte iç içe geçmiş-
lerdir. Ama hücreyi bir uçtan diğerine aşan aktin filamentlerinde
böyle bir düzenleme daha sorunlu olurdu. Motorlar filamentten
ayrıldıklarında bir o yana bir bu yana sallanırlar, yeniden tutun-

maya çalışırlardı. (Gerçi bazı durumlarda elektiriksel etkileşimler motor proteinlerin kablolarına yakından bağlanmalarını sağlar.)

Burada en iyi çözüm “işleyici” bir motordur, aktin hattına bağlı kalıp o hat boyunca bir şekilde hareket edecek (“işleyecek”) bir motor. Karşımıza çıkan da böyle bir şeydir işte. Miyozinin yapısındaki birkaç küçük değişiklik onu, bir aktin filamenti hattından kopmadan hareket etmesini sağlayacak işleyici bir motora çevirir. Peki bunlar ne tür değişikliklerdir? Biri boyunun uzamasıdır. Hatırlayalım, kasta iki miyozin başı birbirine kilitlenmiş, kuyrukları ve boyunlarıyla sıkıca bağlanmışlardı, ama bunun dışında belli ki koordinasyondan yoksunlardı. Boyunları birazcık uzattığınızda, başlar bir derece özerklik kazanır. Bir baş bağlı kalırken, diğeri sallanabilir ve böylece motorun hat boyunca “el el üstünde” ilerlemesini sağlayabilir.⁶ Diğer versiyonlarda sadece iki değil, üç ya da dört baş bir araya gelir. Tabii ki kuyrukların gitmesi gerekir, miyozin başları kalın filamente takılmak yerine artık salınmakta serbesttir. Son olarak “eşleştirici” proteinler sayesinde başka nesneler, her birine bir kargo düşecek şekilde motor başlara asılır. İşte manzara: aktin kabloları üzerinden hücrenin her yerine kargo taşıyabilen bir işleyici motor ekibi.



Motor proteinlerin bu büyük geçit töreni nasıl başlamıştır? Bakteriler dünyasında buna benzer bir şey hiç yoktur. Aktin ve miyozin de ökaryot hücrelerde birlikte hareket eden tek motor ikili değildir. Kinezinler denilen ikinci bir motor protein ailesi de miyozinlere benzer bir şekilde hareket eder, hücre iskeletindeki kablolardan bir o el bir bu el diyerek aşağı yukarı gider gelir. Ama kinezinlerdeki kablolar aktin kabloları değil, mikrotüp olarak bilinen, tübülün adlı bir başka proteinin alt birimlerinden oluşturulmuş çapı daha büyük tüplerdir. Kinezinler başka işlerin yanı sıra, hücre bölünmesi sırasında kromozomların bir mikrotüp iğleri üzerinde ayrılmasından da sorumludur. Başka motor protein tipleri de vardır, ama fazla ayrıntıya girmemize gerek yok.

Bütün bu motor proteinlerin ve asıldıkları kabloların, bakte-

rilerde ataları vardır; ama bu atalar genellikle hayli farklı işlerle uğraştıklarından her zaman belirgin değillerdir.⁷ Yine burada da X-ışını kristalografisi tekniği tek başına gen dizilimlerinden anlaşılamayacak akrabalıkları gözler önüne sermiştir.

Gen dizilimlerinin ortaya koyduğu ayrıntılı düzeyde, iki ana motor protein tipinin, miyozinler ve kinezinlerin ortak yönleri yok denecek kadar azdır. Şurada burada benzer bazı yönler görülür, ama uzunca bir süredir bunun ya şans eseri ya da klasik bir yakınsayan evrim vakası olduğu düşünülmüştür. Yakınsayan evrim, birbiriyle ilgisiz iki proteinin benzer bir işte uzmanlaştığını, bu yüzden de yapısal bazı benzerlikler geliştirdiğini söyler, tıpkı yarasalar ve kuşların kanatlarının bağımsız olarak evrilmiş olması, ama ortak sorunları olan uçabilme sorununa benzer çözümler üretmede birbirine yakınsaması gibi.

Ama sonra bu motor protein tiplerinin üç boyutlu yapıları kristalografi sayesinde, atomik çözünürlük düzeyinde görüldü. Gen dizilimi iki boyutlu bir harf dizisi (müziksiz libretto) verirken, kristalografi proteinin üç boyutlu topografisini (görkemli bir opera) verir. Wagner bir keresinde müziğin operadaki sözlerden doğması gerektiğini, önce sözlerin geldiğini söylemişti; gelgelelim hiç kimse Wagner'ı sadece güçlü Töton hisleriyle hatırlamaz, bugünlere ulaşp sonraki kuşaklara haz veren şey müziği olmuştur. Gen dizilimi de doğadaki sözler gibidir, ama proteinlerin asıl müziği şekillerinde gizlidir, seçilimle hayatta kalan da şekillerdir. Doğal seçilim gen dizilimlerini umursamaz, işlevi dikkate alır. Genler işlevi belirlese de, bu büyük sıklıkla proteinin şeklini, bugün hakkında hâlâ pek az şey bildiğimiz katlanma kurallarıyla dayatarak gerçekleşir. Sonuçta çeşitli gen dizilimleri birbirinden o kadar ayrılabilir ki, miyozin ve kinezin örneğinde olduğu gibi birbirlerine hiç benzemeyebilirler. Ama protein kümelerinin daha derinden gelen müziği hâlâ oradadır, kristalografinin işitmesini beklemektedir.

O halde, kristalografiye dayanarak, miyozinler ve kinezinlerin, gen dizilimlerinde pek ortak yönleri olmasa bile, gerçekten de ortak bir ataları olduğunu biliyoruz. Üç boyutlu şekilleri,

katlanma ve yapılarında, aynı amaçla korunan kritik önemdeki amino asitlere varıncaya kadar birçok ortak nokta bulunduğunu gösteriyor. Seçilimin hayret verici bir becerisidir bu: Maddenin dokusunun, hatta gen dizilimlerinin zamanla aşınıp gitmesine rağmen, aynı örüntüler, aynı şekiller, aynı boşluklar, milyarlarca yıl boyunca atomik düzeyde korunmuştur. İşte bu şekiller hem miyozinlerin hem kinezinlerin, ataları açıkça bakteri olan daha geniş bir protein ailesiyle akraba olduğunu gösterir.⁸ Bu atalar bir hareket biçimi ve kuvvet uygulamayı gerektiren (örneğin bir duruştan diğerine geçme gibi) işler yapıyorlardı (hatta hâlâ yaparlar), ama hiçbirisi gerçekten de kendiliğinden hareket edebilir değildi. O halde X-ışınlarının bir kuşun kanadının iskelet yapısını göstermesi gibi, kristalografi de bize protein yapısının kemiklerini gösterir. Tıpkı kemik yapılarının ve eklemlerin kanatların atasını ele vermesi, bunların açıkça uçamayan sürüngenlerin uzuvlarından geldiğini görmemiz gibi, motor proteinlerin yapılarının da dış yapıyı belirleyebilen, ama gerçek bir hareketlilik becerisinden yoksun protein atalardan geldiği açıktır.

Kristalografi hücre iskeletinin, aktin ve tübülün hatlarının evrimiyle ilgili olarak da umut verici görüşler sunmuştur. Motor proteinler ortada yokken bir hücrenin neden, bir hava kablo hattı, motor proteinler için hızlı yollar geliştirecek şekilde evrildiğini sorabilirsiniz. Peki böyle bir soruyla işlerin sırasını karıştırmış olmaz mısınız? Hücre iskeleti kendi başına bir değer taşıyorsa olmazsınız. Hücre iskeletinin değeri yapısal özelliklerinde yatar. Uzun ve cılız nöronlardan düz endotelial hücrelere kadar bütün ökaryot hücrelerin şekli, hücre iskeletinin lifleriyle ayakta tutulur, öyle anlaşıyor ki aynısı büyük ölçüde bakteriler için de geçerlidir. Kuşaklar boyunca biyologlar hücreyi çevreleyen katı hücre duvarına birçok bakteriyel şekil (çubuklar, sarmallar, hilaller vs.) atfetmiştir, bu yüzden de 1990'ların ortalarında bakterilerin de hücre iskeletine sahip olduğunu keşfedilmesi bir şaşkınlığa sebep olmuştur. Bakterilerin hücre iskeleti, aktin ve tübüline çok benzeyen ince liflerden oluşur, artık bu liflerin bakterilerin daha incelikli şekillerini korumaya yaradığını bili-

yoruz. (Hücre iskeletindeki mutasyonlar, bu karmaşık bakteriyel hücreleri şişirip basit kürelere dönüştürmüştür.)

Motor proteinlerde olduğu gibi, bakteri ve ökaryot proteinleri arasında da genetik benzerlik azdır. Ama binyıl başında kristalografi sayesinde anlaşılan üç boyutlu yapılar, motor proteinlerin yapılarından çok daha çarpıcıdır. Bakteriyel ve ökaryot protein yapıları neredeyse üst üste bindirilebilir; ikisinde de aynı şekiller, aynı boşluklar, bazı yerlerde aynı kritik amino asitler gözlenir. Açıktır ki ökaryot hücre iskeleti, bakterilerdeki benzer bir hücre iskeletinden evrilmiştir. Şekille birlikte işlev de korunmuştur. Şekil de işlev de daha kapsamlı bir yapısal role hizmet eder, bakterilerde de ökaryot hücrelerde de hücre iskeleti sadece durağan bir destek vermekten ötesini gerçekleştirebilecek yetiye sahiptir. Bizim katı kemikli iskeletimize benzemez, dinamiktir, durmadan değişir, kendisini yeniden şekillendirir, fırtınalı bir günde gökyüzündeki bulutlar kadar kararsız ve her şeyi kapsayıcıdır. Kuvvet uygulayabilir, kromozomları hareket ettirebilir, kopyalama sırasında hücreleri ikiye bölebilir ve en azından ökaryot hücrelerde herhangi bir motor proteinin yardımı olmaksızın hücresel uzantılar çıkarabilir. Kısacası hücre iskeleti kendi başına hareketlidir. Peki böyle bir şey nasıl ortaya çıkmıştır?



Hem aktin hem tübülün filamentleri, toplanıp uzun zincirler, yani polimerler oluşturan protein alt birimlerinden oluşur. Bu polimerleşme becerisi olağandışı değildir, nihayetinde plastığı yapan da sonu gelmez moleküler zincirler halinde tekrarlanan temel birimlerden oluşan polimerlerdir. Hücre iskeletinde olağandışı olan şey, yapının dinamik bir **denge** içinde olmasıdır: Eklenen birimlerle çıkan birimler arasında, polimerleşme ile polimerleşmenin bozulması arasında sürekli değişen bir denge vardır. Sonuçta hücre iskeleti sürekli kendisini yeniden şekillendirir, kurar ve yıkar. Ama işte büyü de buradadır. Yapı taşları zincirin sadece bir ucuna eklenebilir (Lego parçaları gibi, daha doğrusu badminton topu yığını gibi birbirlerinin üstüne oturur-

lar) ve öbür ucundan ayrılabilirler. Bu da hücre iskeletine kuvvet üretebilme becerisi verir. Şimdi de sebebine geelim.

Birimlerin zincirin bir ucuna eklenme hızı, öbür uçtan ayrılma hızına eşit olursa, polimer bir bütün olarak sabit bir uzunlukta kalır. Bu durumda, zincir alt birimlerin eklendiği yönde ilerliyormuş gibi görünür. Hareketli zincirin yoluna çıkan bir nesne, fiziksel olarak itilebilir. Aslına bakarsanız, nesne zincir tarafından hareket ettirilmez. Gerçekte nesne, moleküler kuvvetlerin rastgele sarsılmalarıyla sallanır, ama her seferinde nesne ile zincirin eklenen ucu arasında küçük bir boşluk oluşur, buraya ekstra bir ara birim girip bağlanabilir. Zincirin bu şekilde uzaması, nesnenin geriye doğru hareket etmesini engeller; bu yüzden de rastgele sarsılmalar onu ileri doğru itme eğilimi gösterir.

Herhalde bunun en açık örneği, bakterinin hücre iskeleti topluluğunu değiştirdiği bazı bakteri enfeksiyonlarında görülür. Örneğin yeni doğmuş bebeklerde menenjitte yol açabilen *Listeria* bakterisi, konak hücrenin hücre iskeletinin kontrolünü ele geçiren iki-üç protein salgılar. Sonuçta, bakteriler enfekte olmuş hücrenin içinde hareket eder, arkalarından onlara bağlanan ve ayrılan aktin bir "kuyruk" tarafından itilir. Bakterilerin kendilerinde de hücrenin kopyalanması sırasında kromozomlar ve plazmidlerin (küçük DNA halkaları) ayrılması için benzer bir sürecin işlediği sanılmaktadır. Amiplerde (hatta makrofajlar gibi bizim bazı bağışıklık sistemi hücrelerimizde) benzer bir şey olur. Hücrenin çıkıntıları (yalancı ayaklar) aktin filamentlerinin dinamik toplanması ve ayrılması sayesinde itilir. Sofistike motor proteinlere hiç ihtiyaç olmaz.

Dinamik bir hücre iskeleti kulağa büyüymüş gibi gelebilir, ama Harvard'da çalışan biyokimyager Tim Mitchison'a göre durum böyle olmaktan çok uzaktır. Bütün bunların temelinde daha yüksek bir evrime gerek olmaksızın gerçekleşen kendiliğinden bir fiziksel süreç vardır. Hiçbir yapısal rolü olmayan proteinler, hiçbir işaret olmaksızın birden polimerleşebilir ve ayrılıp aynı hızla eski hallerine dönmeden önce kuvvet üretebilen büyük bir hücre iskeleti oluşturabilir. Böyle bir davranış telaşlandırıcıymış

gibi gelebilir, hatta genellikle hiç hoş karşılanmaz. Örneğin, orak hücre anemisinde bir hemoglobin varyantı birden polimerleşip bir iç çerçeve oluşturur, ama ancak ve ancak oksijen düzeyi düşükse. Bu değişiklik, kırmızı kan hücresini hastalığa adını veren orak şekline sokar, başka bir deyişle ona kuvvet uygular. Oksijen düzeyi yeniden yükseldiğinde, bu anormal iskelet kendi kendisini aynı derecede kendiliğinden bozar, hücreyi eski normal disk şekline döndürür. Kuvvet üreten dinamik bir hücre iskeletidir bu, hatta son derece yardımcı bir hücre iskeletidir.⁹

Ökaryot hücre iskeletinde de uzun zaman önce buna benzer bir şey olmuş olsa gerektir. Aktin ve tübülün lifleri hücrenin diğer işlevleriyle birlikte sıradan proteinlerden gelmiştir. Bu proteinlerin yapısındaki birkaç önemsiz değişiklik (hemoglobin varyantında olduğu gibi) onların kendiliğinden toplanıp filamentler oluşturmasını sağlamıştır. Fakat orak hücre anemisinin tersine, bu değişikliğin açık bir yararı olması gerekir, çünkü doğal seçim tarafından korunmuştur. Bu açık yarar doğrudan, hatta hareketle ilgili bile olmayabilir. Aslına bakılırsa, orak hücre hemoglobini sıtmanın yaygın olduğu bölgelerde, sıtmaya karşı koruyucu olan hatalı genin tek bir kopyası olarak seçilmiştir. Uzun süreli ve acı verici nöbetlere (orak hücreler esnek değildir ve kılcal damarları tıkar) neden olmasına rağmen, istenmeyen bir hücre iskeletinin kendiliğinden toplanıp oluşması doğal seçim tarafından korunmuştur, çünkü dolaylı ve değerli bir yararı vardır, sıtma parazitlerini uzak tutar.

İşte en temel başlangıç noktasından, iskelet kaslarının müt-hiş gücüne varıncaya dek hareketliliğin ihtişamı bir avuç proteinin işleyişine ve sonu gelmez bir biçimde değişen biçimlerine bağlıdır. Şimdi artık geri kalan sorun, bütün bu muhteşem varyasyonların silinip ana temanın, her şeyi başlatan koronun ortaya çıkarılmasıdır. Bugün en heyecan verici ve tartışmalı araştırma alanlarından biri budur, çünkü bu şarkıyı bütün ökaryot hücrelerin anası, belki de iki milyar yıl önce söylemiştir, zamanda o kadar uzak akorların yankılarını yeniden kurmak zordur. Bu ökaryot atanın hareketliliğinin nasıl evrildiği kesin olarak

bilinmiyor. Uzun bir süre boyunca Lynn Margulis'in savunduğu üzere, hücreler arasında işbirliğinin (simbiyoz) kritik bir rol oynayıp oynamadığından, hücre iskeletinin konak hücrede zaten mevcut olan genlerden evrilip evrilmediğinden emin değiliz. Bazı ilginç muammalar, cevaplandıklarında daha aydınlatıcı olabilirler. Örneğin, bakterilerde kromozomlar aktin filamentlerinin kullanılmasıyla ayrılır, kopyalanma sırasında hücrelerin bölünmesini sağlayan sıkılmayı ise tübülün mikrotüpleri gerçekleştirir. Ökaryot hücrelerdeyse aksi geçerlidir. Ökaryot hücrelerde, hücre bölünmesi sırasında kromozomları ayıran lif iskelesi mikrotübüllerden oluşur, hücreyi bölen sıkıştırıcı korse ise aktinden yapılmıştır. Rollerin bu şekilde tersine çevrilmesinin nasıl ve neden gerçekleştiğini öğrendiğimizde, dünya üzerindeki hayatın ayrıntılı tarihini de hiç kuşkusuz daha iyi anlayacağız.

Ama araştırmacıların önündeki bu büyük zorluklar, gerçekte bugün iyice açıklık kazanmış genel bir tablonun ayrıntılarıdır. Hücre iskeletinin ve motor proteinlerin hangi proteinlerden evrildiğini biliyoruz, bunları simbiyotik bir bakterinin mi yoksa konak hücrenin mi sağladığı büyük tablo açısından o kadar da önemli değil; ikisi de akla yatkın kaynaklardır, cevabı öğrendiğimizde modern biyolojinin temelleri çökmeyecek. Kesin olan bir tek gerçek vardır. Hareket etme becerisinden yoksun, dinamik bir hücre iskeleti ve motor proteinle kuvvet uygulayan ökaryotlar olmuştusa, bunlar artık bulunmuyor; milyonlarca yıl önce, torunlarıyla birlikte ölüp gitmişlerdir. Yaşayan bütün ökaryotların atası kendi kendisine hareket edebiliyordu. Büyük ihtimalle, kendiliğinden hareket beraberinde büyük yararlar getirmişti. Kendiliğinden hareketin yükselişi belki de ekosistemlerin karmaşıklığını ebediyen değiştirmekten fazlasına yol açmıştı. Belki de gezegenimizin çehresinin değişmesini sağlamış, onu bakterilerin hakimiyetindeki basit bir dünya olmaktan çıkarıp bugün seyrettiğimiz, coşup taşan harikalar dünyası haline getirmiştir.

VII

Görme

Körler Diyarından



Görme hayli ender rastlanan bir şeydir. Bitkiler aleminde, ayrıca mantarlar, algler ve bakterilerde en azından bildiğimiz anlamda gözler yoktur. Hayvanlar aleminde bile gözler yaygın bir özellik değildir. Hayvanlar aleminde temelde birbirinden farklı 38 beden planı modeli (filum) olduğu söylenir, gelgelelim bunların sadece altısı gerçek gözü icat etmiştir. Geri kalanlar yüz milyonlarca yıl boyunca bir şey görmenin yararını tatmadan yaşamıştır. Doğal seçim, göremiyorlar diye onları cezalandırmamıştır.

Bu çetin geçmişle birlikte düşünüldüğünde, gözün evrimsel yararlarının muazzam olduğu anlaşılır. Bütün filumlar eşit değildir, ayrıca bazıları diğerlerinden çok çok daha fazla eşittir. Örneğin *Chordata*, bizi ve başka omurgalıları içeren filumda 40.000'i aşkın tür vardır; salyangozlar, ahtapotlar ve sümüksü böcekleri içeren *Mollusca*'da 100.000 tür bulunur; kabuklular, örümcekler ve böceklerin dahil olduğu *Arthropoda*'da bir milyonu aşkın tür vardır, bu filum tanımlanan bütün türlerin yüzde 80'ini oluşturur. Oysa çoğunlukla sadece klasik eğitim almış zoologların bildiği cam süngerler, tekerlekli hayvanlar, priapulid solucanlar ve taraklılar gibi az bilinen filumların çoğunda nispeten daha az tür vardır, onlarla ya da yüzlerle ifade edilir; *Placozoa*'da sadece bir

tür vardır. Bütün bunları topladığımızda, hayvan türlerinin yüzde 95'inin gözleri olduğunu görürüz, gözleri icat eden filumların bugün hayvanlar alemine hakim olduğu su götürmez.

Bunun şaňstan başka bir sebebi olmayabilir elbette; belki de bu filumların beden planlarında, gözlerle hiç ilgisi olmayan, bizim gözden kaçırdığımız başka incelikli yararlar söz konusudur. Ama bu pek muhtemel görünmüyor. Sırf ışığın varlığını ya da yokluğunu tespit etmek yerine uzamsal görüş yetisine sahip gerçek gözlerin evrimi, neresinden bakılırsa bakılsın evrimi dönüştürmüş gibi görünüyor. İlk gerçek gözler fosil kayıtlarında yaklaşık 540 milyon yıl önce, o "büyük evrim patlaması"nın, yaygın deyişle Kambriyen patlamasının, hayvanların fosil kayıtlarında nefes kesici bir çeşitlilik sergilediği dönemin başlangıcına yakın bir tarihte birden ortaya çıkmıştır. Milyonlarca yıldır sessiz olan kayaların içinde, önceden hiçbir işaret olmaksızın, modern hayvan filumlarının neredeyse hepsi boy göstermiştir. Fosil kayıtlarına göre hayvan hayatının patlamasıyla gözlerin icadı arasında zamansal olarak böyle yakın bir örtüşme bir tesadüf değildir, buna kesin gözüyle bakılabilir; çünkü uzamsal görüş, avcılar ve avları tümüyle farklı bir konuma yerleştirmiş olsa gerektir; sırf bu bile Kambriyen hayvanlarında ağır zırhların sık görülmesini, fosilleşme ihtimalinin daha artmasını açıklayabilir. Bugün Londra'da Doğa Tarihi Müzesi'nde biyolog olarak görev yapan Andrew Parker, eğlenceli, ama zaman zaman öfkeli bir yandaşlığa kapılan bir kitabında, gözlerin evriminin Kambriyen patlamasının itici gücü olduğunu savunan akla yatkın bir argüman sunmuştu. Gözlerin gerçekten de böyle birden evrilip evrilemeyeceği (ya da fosil kayıtlarının bu bakımdan aldatıcı olup olmadığı) daha sonra değerlendireceğimiz bir soru. Şimdilik, görmenin dünya hakkında koklama, duyma ya da dokunmanın verebileceğinden çok daha fazla bilgi verdiğini belirtelim, çünkü dünya ışığa boğulmuştur, görülmekten kaçınmamız da mümkün değildir. Hayatın en muhteşem uyarlanmalarının çoğu, ister bir tavus kuşu ya da bir çiçek örneğinde olduğu gibi seks için çalım satmak olsun, ister bir stegosaurusun büyük zırhlı levhalarıyla

geçit yapması olsun, ister sopa çekirgesinin dünyasında titizlikle gizlenmek olsun, görülmeye verilen karşılıklardır. Toplumlarımızın görüntü bilinci o kadar yüksektir ki söylediklerimin anlaşılması için pek çaba sarf etmem gerekmiyor.

Yararın ötesinde, görmenin evrimi kültürel bakımdan da ironiktir, çünkü gözler çok mükemmel görünür. Darwin'den bu yana gözler, doğal seçim mefhumuna bir meydan okuma, onu yalancı çıkararak bir kanıt olarak algılanmıştır. Bu kadar karmaşık, bu kadar mükemmel bir şey bir rehberi, bir kılavuzu olmaksızın evrilmiş olabilir mi? Şüpheler, yarım bir gözün nasıl bir yararı olabilir diye sorar. Doğal seçim bir milyon basamak gerektirir, her birinin kendisinden önce gelenden daha iyi olması gerekir, yoksa yarı yarıya inşa edilmiş bir yapı dünya üzerinden acımasızca silinir, derler. Gözün tıpkı bir saat gibi mükemmel olduğunu, indirgenemez olduğunu söylerler. Parçalardan birkaçını kaldırdığınızda işlemeyeceğine dikkat çekerler. Akrebi ve yelkovanı olmayan bir saatin pek değeri yoktur, merceği ya da retinası olmayan bir göz de değersizdir ya da bize öyle olduğu söylenir. Yarım gözün bir yararı yoksa, göz de doğal seçimle ya da modern biyolojinin bildiği herhangi bir yolla evrilmiş olamaz, o yüzden de aslında göksel bir tasarımın kanıtı olmalıdır.

Biyoloji alanında mükemmellik ile ilgili iğneleyici argümanlar, çoktan yerleşiklik kazanmış siperleri derinleştirmekten başka bir işe pek yaramaz. Darwin savunucuları, bu argümanlara, gözlük ya da kontak lens takan birinin, görme becerisini yitiren birinin gayet iyi bildiği üzere, gözün aslında mükemmellikten uzak olduğunu söyleyerek cevap verir. Bu kesinlikle doğrudur, ama bu tarz kuramsal argümanlarda bir tehlike vardır, o da var olduğu su götürmeyen birçok inceliği gözden kaçırmaktır. Örneğin insan gözünü ele alalım. Yaygın argümana göre, tasarım kusurları çok derindir ve aslında bunlar öngörü sahibi olmamaktan mustarip evrimin yetersiz, plansız yapıları bir araya getirme biçiminin iyi birer kanıtıdır. Mühendis bir insanın daha iyi bir iş çıkaracağı söylenir, hatta bir ahtapot bile daha iyi bir iş çıkarır. Yarım yamalak iddialar, Leslie Orgel'in ikinci kanunu olarak bili-

nen muzır (ama yine de bu yüzden doğru) kuralı gözden geçirir: Evrim sizden akıllıdır.

Şu örneği kısaca değerlendirelim. Ahtapotun bizimkine çok benzeyen bir gözü vardır, bir “kamera” gözdür bu: Önde tek bir mercek, arkada hafif duyarlı bir perde, yani retina bulunur (kameradaki filme eşdeğerdir). Ahtapotla ortak olan son atamız muhtemelen doğru düzgün bir gözü olmayan bir solucan olduğundan, ahtapotun gözüyle bizim gözümüz bağımsız olarak evrilmiş, temelde aynı çözümde birbirine yakınsamış olmalıdır. İki gözün ayrıntılı olarak karşılaştırılması bu çıkarımı destekler. Gözlerin her biri embriyoda farklı dokulardan gelişir, sonunda ayrı bir mikroskobik düzenlemeye ulaşır. Ahtapotun gözü çok daha anlamlı bir biçimde düzenlenmiş görünmektedir, retinanın ışığa duyarlı hücreleri ışığa doğru yönelmiştir, nöron kabloları da doğrudan beyne gider. Oysa bizim retinamızın genellikle ters yöne baktığı söylenir, görünüşe bakılırsa aptalca bir düzenlemedir bu. Işığa duyarlı hücreler, dışarı doğru çıkıntı yapmak yerine en arkada oturur, dolambaçlı bir yol izleyerek beyne uzanan nöron kablolarla sarılmışlardır. Işığın ışığa duyarlı hücrelere ulaşması için önce bu kablo ormanını aşması gerekir, daha da beteri bu kablolar bir demet oluşturup retinanın arkasına doğru saplanıp optik siniri oluşturur ve o noktada kör bir noktaya neden olur.¹

Ama bizdeki düzenlemeyi bir kenara atmakta da bu kadar aceleci olmamalıyız. Biyolojide sıklıkla olduğu gibi, durum daha karmaşıktır. Bir kere kablolar renksizdir, dolayısıyla ışığın geçmesini pek engellemezler, engellediklerinde de bir “dalga kılavuzu” olarak davranabilirler, ışığı ışığa duyarlı hücrelere dikey olarak yöneltip mevcut fotonların en iyi şekilde kullanılmasını sağlayabilirler. Herhalde daha da önemlisi, gözümüzdeki ışığa duyarlı hücrelerin doğrudan destekleyici hücrelere (retinal pigment epitelyumu) gömülmüş olması, hemen altlarında da mükemmel bir kan kaynağı olması gibi bir avantaja sahip olmamızdır. Böyle bir düzenleme foto-duyarlı pigmentlerin sürekli değişmesini destekler. İnsan reşinası, gram hesabıyla beyinden bile daha fazla oksijen tüketir, bu da onu bedenin en enerjik organı

haline getirir, yani bu düzenleme son derece değerlidir. Her hâlükarda ahtapotun gözü böyle yüksek bir metabolik hızı koruyamazdı, sonuçta görme yetisinin bundan zarar görmesi gerekirdi.

Vurgulamak istediğim şey şu: Biyolojide her düzenlemenin avantajları ve dezavantajları vardır; sonuç, her zaman değerlendirmediğimiz seçici kuvvetler arasındaki bir dengedir. “Öyle işte” hikayelerindeki sorun budur, genellikle tablonun yarısını görürüz. Doğada çok kavramsal olan argümanlar her zaman karşı darbelere duyarlıdır. Her bilim insanı gibi, ben de veriler zincirini izlemeyi tercih ediyorum. İşte bu noktada moleküler genetiğin son yıllardaki yükselişi bize çok özel sorulara çok özel cevaplar getiren bir veri zenginliği sunuyor. Bu cevapların hepsi bir araya getirilip örüldüğünde, gözün nasıl ve nereden evrildiğine dair inandırıcı bir görüş ortaya çıkar: Şaşırtıcı derecede uzak ve yeşil bir atadan evrilmiştir. Bu bölümde, bu örgüyü izleyerek yarım bir gözün tam olarak neye yaradığını, merceklerin nasıl evrildiğini, retinanın ışığa duyarlı hücrelerinin nereden geldiğini göreceğiz. Hikayenin parçalarını birleştirirken, gözlerin icadının evrimin hızı ve akışını gerçekten de değiştirdiğini göreceğiz.



“Yarım bir gözün ne yararı var?” sorusuna alaycı yaklaşmak çok kolaydır: Hangi yarım, sağ mı yoksa sol mu? Richard Dawkins’in acımasız cevabına yakınlık duyduğum oluyor: Yarım bir göz, bir gözün %49’undan %1 daha iyidir; ama bizim gibi yarım bir gözün görüntüsünü açıkça gözümüzde canlandırmaya çalışanlar için bir gözün %49’u daha da sersemleticidir. Aslında, kelimenin tam anlamıyla “yarım göz” bu soruyu ele almanın çok iyi yollarından biridir. Göz düzgünce iki yarıya ayrılır; ön ve arka. Oftalmologların konferanslarına katılan biri, iki büyük gruba ayırdıklarını görmüştür: gözün ön kısmıyla ilgili çalışmalar yapanlar (mercek ve korneayla uğraşan katarakt ve refraktif cerrahi) ve arka kısım, retinayla ilgili çalışmalar yürütenler, sarı nokta hastalığı (makula dejenerasyonu) gibi körlüğün önemli sebepleriyle uğraşanlar. Bu iki grup birbirleriyle etkileşim kurmaya yanaşmaz,

zaman zaman da pek aynı dili konuşmazlar. Ama aralarındaki ayrım, geçerli bir ayrımdır. Bütün optik donanımlarından sıyıldığında, göz çıplak bir retinadan ibaret kalır: üstünde hiçbir şey olmayan ışığa duyarlı bir perde. İşte böyle çıplak bir retina, evrimin dayanaklarından biri olmuştur.

Çıplak bir retina fikri tuhaf gelebilir, ama aynı derecede tuhaf bir ortama, birinci bölümde ziyaret ettiğimiz okyanusların derinlerindeki kara baca menfezlerine gayet uyumludur. Bu tür menfezler hayret verici bir hayat yelpazesi sunar, buradaki canlıların hepsi de menfezlerden çıkan hidrojen sülfür gazına doğrudan bağımlı olarak yaşayan bakterilere şu ya da bu biçimde bağlıdır. Herhalde en tuhafları ve hiç kuşkusuz en meşhurları da boyları sekiz metreye ulaşan dev boru kurtçuklarıdır (*riftia pachyptila*). Normal solucanlarla uzaktan akraba olsalar da, bu canlılar kelimenin tam anlamıyla midesiz harikalarlardır: Ne ağızları ne bağırsakları vardır, yaşamak için kendi dokuları içinde yaşayan sülfür bakterilerine bağımlıdırlar. Menfezlerde bulunan diğer dev yaratıklar arasında dev deniztarakları ve midyeler de vardır.

Bütün bu devler sadece Pasifik Okyanusu'nda bulunur, Atlantik Okyanusu'ndaki menfezlerde de harikalar yaşar, bunların başında, tüten bacaların altında kovanlar oluşturan karides *Rimicaris exoculata* gelir. İsmi tam olarak "gözsüz yarık karidesi" anlamına gelir, onu icat edenlerin yakasına yapışacak talihsiz ve de yanlış bir isimdir. İsimlerinden ve okyanusun zifiri karanlık derinlerindeki yaşam ortamlarından beklenebileceği üzere, kuşkusuz bu karidesin bildiğimiz anlamda gözü yoktur, yüzeyde yaşayan kuzenlerinin göz saplarından tamamen yoksundurlar. Ama sırtlarında iki büyük kanatçık vardır. Biçimlerini tanımlamak zor olsa da bu şeritler, derin deniz denizaltılarının ışıltısında, kedi gözü gibi ışığı yansıtırlar.

Bu kanatçıkları ilk fark eden Cindy Van Dover olmuştur, onun bu keşfi, zamanımızın en dikkat çekici bilimsel kariyerlerinden birinin de başlangıcı olmuştur. Van Dover, Jules Verne'in bahsedebileceği türden bilimsel bir araştırmacıdır, onun nesli de bugün incelediği türler kadar tükenme tehdidi altındadır. Van Dover

bugün Duke Üniversitesi Deniz Laboratuvarı'nın başkanıdır; donanmaya bağlı derin deniz denizaltısı *Alvin*'in ilk kadın pilotudur. Bilinen menfezlerin neredeyse hepsini görmüş, incelenmemiş olanların da birkaçına gitmiştir. Daha sonraları tam olarak aynı dev deniztarakları ve dev kurtçukların deniz tabanında soğuk yerlerde, metan gazının dünyanın bağırsağından sızdığı yerlerde yaşadığını keşfetti. Açıktır ki hayatın deniz dibindeki bolluğunun gerisindeki itici güçsüzlükten ziyade kimyasal koşullardır. Ama 1980'lerin sonlarında bu henüz bilinmiyordu, Van Dover kör karidesin kanatçık dokusu numunelerini omurgalı gözleri alanında çalışan bir uzmana gönderip, "Bu göz olabilir mi acaba?" diye biraz sakat bir soru yöneltirken bir hayli tedirgin hissetmiş olsa gerek. Aldığı özlü cevapta, bir retinayı silindirden geçirirsen biraz böyle görünebilir deniyordu. Gözlerin olağan donanımından (mercek, iris vs.) yoksun olan kör karidesin, okyanusun derin karanlıklarında yaşamasına rağmen çıplak retinaymış gibi görünen, sırtının yarısına kadar inen bir organı vardı (Şekil 7.1).

Daha başka araştırmalar yürütüldü, bulgular, Van Dover'ın ummaya cesaret edebileceğinden daha iyiydi. Çıplak retinaların, bizim retinamızda ışığı tespit etmeye yarayan pigmente çok benzer özelliklere sahip bir pigment (rodospin) taşıdığı anlaşıldı. Üstelik bu pigment, her ne kadar retinanın genel görünümü çok farklı olsa da, normal karideslerin gözlerindeki ışığa duyarlı hücrelerde de bulunuyordu. Herhalde kör karides gerçekten de okyanusun dibinde ışığı görebiliyordu. Van Dover merak etti: Acaba menfezler solgun bir ışık üretiyor olabilir miydi? Ne de olsa ampul telleri ısındığında parlar, menfezler de hiç kuşkusuz hem sıcaktır hem de çözünmüş metallerle doludur.

Daha önce hiç kimse *Alvin*'in ışıklarını söndürmemişti. Zifiri karanlıkta böyle bir hareket saçma olmaktan öteye gidiyordu, denizaltının bir menfezin içine sürüklenip içindekilerin, en azından donanımının kızarıp kebab olmasına sebep olması işten bile değildi. Van Dover henüz menfezlere kendisi inmemişti, ama aşağıya inecek olan jeolog John Delaney'i ışıkları söndürüp menfeze bir dijital kamera tutmaya ikna etti. Çıplak gözle bakıl-



Şekil 7.1 Gözsüz karides
Rimicaris exoculata; açık renk
iki çıplak retinanın arkaya
doğru uzandığı görülüyor.

dığında zifiri karanlık olduğu gibi duruyorsa da, Delaney kame-rayla menfezin etrafında hatları gayet keskin bir hale yakaladı: “Karanlıkta bir Cheshire kedisinin sırtışı gibi aslıydı.” Böyle bile olsa, bu ilk resimler ne tür, ne renk, ne parlaklıkta bir ışık salındığına ilişkin bir fikir vermiyordu. Biz hiçbir şey göremiyorken karidesin menfezlerin ışıltısını “görmesi” mümkün müydü?

Sıcak teller gibi, kara bacaların da termal tayfa (yakın kızılötesine) yaklaşan dalga boylarında kızıl ışık saçtığı tahmin ediliyordu. Kuramsal olarak daha kısa dalga boylarının, tayfın sarı, yeşil ve mavi kısımların salınmaması gerekiyordu. Bu tahmin, merceğin üzerine renkli filtrelerin yerleştirildiği, biraz ham kalan ilk ölçümlerle doğrulanmıştı. Karides menfezlerin ışıltısını görebiliyorsa, gözlerinin de kızıl ya da yakın kızılötesi ışınları görmeye “ayarlı” olması gerekiyordu. Ne var ki karidesin gözü üzerinde yapılan ilk incelemeler bunun aksini gösteriyordu. Rodopsin pigmenti en çok yaklaşık 500 nm dalga boyundaki yeşil ışıkla harekete geçiyordu. Bu durum bir sapma deyip geçiştirilebilirse de, karidesin retinasının elektririk okuması her ne kadar gerçekleştirmesi çok zor olsa da, hayvanın sadece yeşil ışığı görebildiğini doğruluyordu. Bu çok tuhaftı. Menfezler kızıl ışık saçıyorsa, karides de sadece yeşili görebiliyorsa kör gibiydi. Acaba bu çıplak retinalar işlevsiz miydi, mağara balığının kör gözleri gibi dejenere olmuş organlar mıydı? Karideslerin başlarında değil sırtlarında bulunmaları, dejenere olmadıklarını düşündürüyordu, ama bu varsayımın kanıt sayılması zordu.

Kanıt, larvaların keşfedilmesiyle geldi. Menfez dünyası gö-

ründüğü kadar ebedi değildir, tek tek menfezler genellikle ölüp gider, insan ömrüne denk düşen bir süre zarfında içlerinden akanlarla boğulurlar. Okyanus tabanında başka yerlerde, genellikle kilometrelerce ötede yeni menfezler patlak verir. Menfez türleri, hayatta kalabilmek için, ölen menfezden ayrılıp doğan menfezlere gitmelidir. Çoğu türde yetişkinlerin hareketliliği menfez koşullarına yakından uyulanmış olmaları yüzünden engellenmişse de (bir ağızları ve bağırsakları olmayan dev boru kurtçuklarını [*riftia pachyptila*'ları] bir düşünün) larvaları okyanuslara dağılabilir. Larvaların yeni menfezlere şans eseri mi (derin okyanus akıntıları yüzünden dağılarak) yoksa bilinmeyen bir yuva bulma aygıtı sayesinde mi (örneğin kimyasal bileşenleri takip ederek) ulaştığı, bilinmeyen bir noktadır; ama larva biçimleri menfez dünyasına henüz tam anlamıyla uyulanmış değildir. Çoğunlukla hâlâ denizlerin derininde olsalar da, yüzeye çok daha yakın yerlerde, gün ışığının ölmekte olan huzmelerinin süzül­düğü bir seviyede bulunurlar. Başka bir deyişle, larvalar gözlerin yararlı olduğu bir dünyada yaşar.

Belirlenen ilk larvalar arasında *Bythograea thermydron* diye bilinen bir yengecin larvası da vardı. İlginçtir, yetişkin yarık karidesleri gibi, yetişkin yengeç de doğru dürüst gözler yerine bir çift çıplak retinaya sahiptir; ama karidesin tersine, bu retinalar yengecin başında, gözlere rastlamayı umduğumuz yerde bulunur. Ama en çarpıcı bulgu, bu yengecin larvalarının gözleri olmasıdır, en azından bir yengeç için mükemmel derecede normal gözleri vardır. Demek oluyor ki gözler yararlıyken yengeçlerin gözler vardı.

Sonra bir larvalar geçidi oldu. Birkaç yarık karidesi türü *Rimicaris exoculata*'yla birlikte yaşar, ama bunlar sürüler halinde gezmeyen yalnız hayvanlar olduklarından, kolayca gözden kaç­ırlar. Onların da çıplak retinalara sahip oldukları anlaşıldı, sırtlarında değil de başlarındaydı bu retinalar ve yengeçler gibi onların larvalarının da mükemmel denecek kadar normal gözleri vardı. Hatta tanımlanan son larva *Rimicaris*'in larvası oldu, bu larvalar kısmen diğer karidesin larvalarına kafa karıştıracak

kadar çok benzedikleri için, kısmen de başlarında hayli normal gözler bulunduğu için en son tanımlanmışlardı.

Larvalarda normal gözlerin keşfedilmesi son derece anlamlıydı. Çıplak retinanın dejenere bir gözden ibaret olmadığı anlamına geliyordu; kuşaklar boyunca süren kaybın vardıgı son nokta, zifiri karanlıktaki bir hayatla uyumlu kalıntı bir işlev değildi. Larval biçimlerin mükemmel derecede iyi gözleri vardı, olgunlukta bunları kaybetmeyi tercih ediyorlarsa, bunun kuşaklar boyunca süren geri döndürülemez evrimsel bir kayıpla ilgisi yoktu: Yararları ve zararları ne olursa olsun daha kasti bir şeydi. Aynı sebepten, çıplak retina sıfırdan evrilip “gelişmiş”, bu karanlıkta kalmış ortamda, görüntü oluşturan gerçek bir göze asla rakip olamayacak düşük düzeyli bir performansla da ulaşmış değildi. Aksine, larvalar olgunlaşıp yetişkin biçimlerini alır, menfezlerin altlarına inerken gözleri dejenere oluyor, neredeyse kayboluyordu; muhteşem optikleri titiz adımlarla yeniden emiliyor, geride çıplak bir retina kalıyordu. Sadece *R. exoculata* örneğinde gözler tamamen kayboluyor, çıplak retinalar belli ki hayvanın sırtında sıfırdan geliyordu. Genel olarak bakıldığında, çıplak bir retina bir dizi farklı hayvanda tam bir gözden daha yararlıymış gibi görünüyordu: Tek bir örnek değildi, bir tesadüf değildi. Neden?

Çıplak bir retinanın değeri, çözünürlük ile duyarlılık arasındaki dengede yatar. Çözünürlük bir görüntünün ayrıntılarını görme becerisini ifade eder. Bir mercekle, korneayla vs. iyileşir, çünkü bütün bunlar ışığın retinaya odaklanıp bir görüntü oluşturmalarını sağlar. Duyarlılık ise karşıt bir süreçtir, fotonları tespit etme becerisini ifade eder. Duyarlılığımız düşükse mevcut ışığı iyi kullanamayız. İnsanlar olarak, ışığa duyarlılığımızı gözbebeğini geliştirip ışığa daha duyarlı bir hücre nüfusunu (çubuk hücreleri) kullanmaya geçerek destekleriz. Ama böyleyken bile, bu gibi önlemler bizi ancak bu noktaya kadar getirebilir; görüntüleri çözmek için gerekli mekanik icatlar, duyarlılığımızı nihayetinde sınırlar. Duyarlılığı artırmanın tek yolu, merceği ortadan kaldırmak, gözbebeğini sınırsızca genişletmek, ışığın göze girebileceği açığı artırmaktır. En büyük gözbebeği, hiç gözbebeğinin olmamasıdır, çıplak bir retinadır. Bu etkenler dikkate alındığın-

da, hayli basit bir hesaplama, yetişkin yarık karideslerinde çıplak retinanın larvaların tam anlamıyla oluşmuş gözlerinden en az yedi milyon kat daha duyarlı olduğunu ortaya koymaktadır.

Böylece karides çözünürlüğü feda ederek, son derece düşük düzeylerdeki ışığı tespit edebilme, hatta ışığın nereden geldiğini, en azından hangi yarıküreye (aşağı mı yukarı mı, arka mı ön mü) yakın olduğunu anlama becerisi kazanmıştır. Işığı tespit edebilme becerisinin kazanılması, birkaç saniyede pişiriverecek kadar sıcak ısılarla hayatta kalmayı imkansız kılacak kadar soğuk ısılar arasında salınan bir dünyada, hayat ile ölüm arasındaki farkı belirleyebilir; karidesi dış uzayda sürüklenen, uzay gemisiyle bağlantısını kaybetmiş bir astronota benzetiyorum. Bu durum, menfezlerin hemen altındaki çıkıntılarda sürüler halinde yaşayan *R. exoculata*'nın gözlerinin neden sırtında olduğunu açıklayabilir. Kafası kalabalık bir sürünün derinlerine gömülmüşken, yukarıdan aşağıya süzülüp sırtına vuran doğru miktarda ışığı tespit etmek hiç kuşkusuz daha rahattır. Bu karidesin yalnız yaşayan akrabaları belli ki biraz farklı bir uzlaşma sağlamışlardır, onların çıplak retinaları başlarındadır.

Karidesin kırmızı bir dünyada neden yeşil gördüğünü sonraya bırakıyoruz (renk körü degillerdir). Şimdilik anlaştığımız nokta, en azından belli koşullarda, yarım bir gözün, çıplak bir retinanın tam bir gözden daha iyi olduğudur. Yarım bir gözün hiç göz olmamasından ne kadar iyi olduğunu değerlendirmeyese pek gerek yok.



Çıplak, basit bir retina (ışığa duyarlı büyük bir nokta) aslında gözün evrimiyle ilgili çoğu tartışmada hareket noktası olmuştur. Darwin bu sürecin ışığa duyarlı bir noktayla başladığını hayal etmişti. Gözler konusunda sadece doğal seçim gerçekliğini kabul etmeye yanaşmayanlar değil, böyle büyük bir adamın gözünden kaçtığı varsayılan bir sorunu "çözmeye" hevesli bilim insanları da genellikle Darwin'den sıkıntı verecek kadar bağlam dışı alıntılar yaparlar. Örneğin şöyle yazdığı aktarılır:

Odak noktasını farklı mesafelere göre ayarlamaya, farklı miktarlarda ışık kabul etmeye, küresel ve renksel sapmaları düzeltmeye yönelik, taklit edilemez bütün o donanımıyla gözün doğal seçilimle oluştuğunu varsaymak, itiraf etmem gerekirse, hiç olmayacak kadar saçma görünüyor.

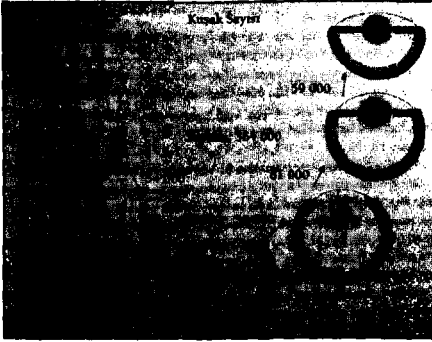
Oysa bundan sonra gelen, Darwin'in gözü doğal seçilimin önünde bir engel olarak görmediğini açıkça ortaya koyan cümle genellikle atlanır:

Gelgelelim mantuğım bana diyor ki mükemmel ve karmaşık bir gözden, çok kusurlu ve basit bir göze uzanan çok sayıda basamağın var olduğu, her basamağın sahibine yararlı olduğu gösterilirse; ayrıca göz çok hafif farklılıklar gösterebiliyor, bu farklılıklar kalıtımla miras alınabiliyorsa, ki durum kesinlikle böyledir, bu organdaki herhangi bir varyasyon ya da değişiklik hayat koşullarının değiştiği bir ortamda yaşayan bir hayvana yararlı oluyorsa, bu durumda her ne kadar hayal gücümüze sığmıyorsa da mükemmel ve karmaşık bir gözün doğal seçilimle gelişebileceğine inanmanın zorluğu, pek gerçekmiş gibi değerlendirilemez.

Daha açık bir deyişle, Darwin, bazı gözler diğerlerinden daha karmaşıksa, görüş gücündeki farklılıklar kalıtımla miras alınabiliyorsa, görme bozukluğu bir dezavantajsa, gözlerin evrilebileceğini söyler. Bütün bu koşullara bol miktarda örnek gösterilebilir. Dünya, merceğin olmadığı göz noktaları ve çukurlarından oluşan basit ve kusurlu gözlerden tutun, Darwin'in "taklit edilemez donanım" dediği özelliklerin bazılarını ya da hepsini gösteren daha sofistike gözlere kadar çok çeşitli gözlerle doludur. Görüş gücü kesinlikle farklılık göstermektedir, gözlük takanlar ya da görme yetilerini acıyla yavaş yavaş kaybedenler bunu gayet iyi bilirler. Ve tabii ki "mükemmellik" görelidir. Bir kartalın gözlerinin çözünürlük yetisi bizimkinden dört kat fazladır, kartallar ayrıntıları bir kilometre öteden seçerler, bizler de görüntüleri sanat eseri sayılabilecek kadar pikselleşmiş algılayan birçok böcekten seksen kat daha iyi görürüz.

Çoğu kişinin Darwin'in koyduğu koşulları tereddütsüz kabul edeceğini düşünsem de, bütün ara aşamaları tahayyül etmek hâlâ zordur: PG Wodehouse'un deyişini biraz değiştirerek söylersek, bütün yelpazenin tahayyülü tam olarak akla hayale sığmaz değilse de sıgmaktan çok uzaktır.² Biraz önce gördüğümüz gibi, her adım kendi içinde yararlı olmadığı sürece karmaşık bir göz evrilemez. Ama aslına bakılırsa, bu ilerlemenin kolayca kavranabileceği anlaşılır. Şekil 7.2'de İsveçli bilim insanları Dan-Eric Nilsson ve Susanne Pelger tarafından basit adımlardan oluşan bir dizi olarak örneklenmiştir. Peş peşe gelen her adım, çıplak bir retina ile başlayıp bir balığın gözüne benzeyen, bizimkine yakın bir göze varıncaya kadar bir iyileşmedir. Elbette ki daha ileri gidebilir (gider de). Gözbebeğini genişletip küçültme ve parlak gün ışığından akşam alacakaranlığına varıncaya dek göze giren ışığı ayarlama becerisine sahip bir iris ekleyebiliriz. Merceğe şeklini değiştirecek, onu çekecek ya da yassıltacak, gözün odak noktasını değiştirip yakından uzak noktalara odaklanmasını sağlayacak kaslar ekleyebiliriz. Ama bunlar birçok gözde olmayan ince rötüşlerdir, zaten var olan bir göze eklenebilirler. Bu yüzden bu bölümde, tercihe bağlı ekstralar konusunda biraz hantal olsa da, görüntü oluşturan işlevsel bir gözün evrimindeki benzer adımlarla yetineceğiz.³

Bu sıralamada kritik nokta şudur: En kaba mercek bile hiç mercek olmamasından iyidir (elbette ki bir kara baca dışındaki yerlerde), bulanık bir görüntü hiç görüntü olmamasından iyidir. Yine burada da çözünürlük ile duyarlılık arasında bir pazarlık olur. Örneğin, hiç merceği olmayan bir iğne deliği kamera kullanılarak son derece iyi bir görüntü oluşturulabilir. Gerçekten de iğne deliği gözler bazı türlerde mevcuttur, bunların başında da ammonitin yaşayan bir akrabası olan notilus gelir.⁴ Notilusun sorunu duyarlılıktır, keskin bir görüntü küçük bir açıklık gerektirir, böylece göze daha az ışık girebilir. Işığın zayıf olması halinde, görüntü pratikte çözünür olamayacak kadar bulanık olur, derin ve karanlık sularda yaşayan notilusun sorunu da budur. Sussex Üniversitesi'nde hayvan gözleri üzerine çalışan



Şekil 7.2 Dan-Eric Nilsson ve Susanne Pelger'a göre gözün evrilebilmesi için gerekli adımlar; her bir değişiklik için geçmesi gereken kuşak sayısı yaklaşık olarak belirtilmiştir. Her kuşağın bir yıl olduğu varsayılırsa tam bir gelişme yarım milyon yıldan daha az bir süre gerektirir.

önde gelen otoritelerden biri olan Michael Land, bir göze onunla aynı büyüklükte bir mercek eklemenin gözü 400 kat daha duyarlı hale getireceği, çözünürlüğü 100 kat artıracığı sonucuna varmıştır. Dolayısıyla, herhangi bir mercek oluşturma yolundaki adımların ödülü büyüktür, hayatta kalma ihtimalinin daha fazlalaşmasıyla gelen bir ödüldür bu.

Evrilen ilk “düzgün” görüntü oluşturan mercek, zırhlı kaplamalarıyla Orta Çağ şövalyelerini anımsatan, 300 milyon yıl boyunca birçok türü denizlerde yaşamış bir trilobite aitti muhtemelen. En eski trilobit gözü, bilinen en eski trilobitte bulunuyor, varlığı 540 milyon yıl öncesine, bu bölümün başında belirttiğimiz üzere, Kambriyen “patlaması”nın başlangıcına yakın bir tarihe uzanıyordu. Bundan 30 milyon yıl sonra elde edilen optik zaferlerin yanında biraz mütevazı kalsa da, trilobit gözlerinin fosil kayıtlarında belirmesi, “Gözler gerçekten bu kadar hızlı evrilmiş olabilir mi?” sorusunu akla getirir. Evrildiyse, Andrew Parker’ın savunduğu üzere, Kambriyen patlamasının itici gücü pekala görüş gücü olmuş olabilir. Yok evrilmediyse, gözlerin daha önce ortaya çıkmış olması, bir sebepten ötürü hiç fosilleşmemiş olması gerekir. Durum böyleyse, gözlerin, biyolojinin büyük patlamasının itici gücü oldukları pek söylenemez.

Çoğu kanıt, Kambriyen patlamasının, ortaya çıktığı tarihte ortaya çıktığını, çünkü çevre koşullarındaki bir değişikliğin boyutun yarattığı darboğazdan bir kaçış imkanı sunduğunu düşündürür. Kambriyen hayvanlarının atalarının minicik, sert kısımlardan yoksun olduğu neredeyse kesindir; fosillerinin bu-

lunmaması bununla açıklanabilir. Boyut, yararlı gözlerin evrimini de engellemiş olsa gerektir. Uzamsal görüş büyük bir mercek, kocaman bir retina, girdileri yorumlama yetisine sahip bir beyin gerektirir; dolayısıyla ancak bu talepleri karşılayabilecek kadar büyük hayvanlarda evrilebilir. Çıplak bir retina, ilkel bir sinir sistemi gibi temel parçaların büyük bölümü, muhtemelen Kambriyen öncesinin küçük hayvanlarında mevcuttu, ama boyutların küçüklüğü daha ileri gelişmelerin olmasını neredeyse kesinlikle engelliyordu. Büyük hayvanların evrilmesinin ardındaki itici güç büyük ihtimalle havada ve denizdeki oksijen düzeyinin artmasıydı. Büyük boyutlar ve avcılık ancak oksijen düzeyinin yüksek olması halinde mümkündür (başka hiçbir şey bunun için gerekli enerjiyi karşılayamaz, bkz. üçüncü bölüm) oksijen de Kambriyen Çağı'ndan kısa bir süre önce, "Kartopu Dünya" olarak bilinen bir dizi küresel buzlanmanın ardından hızla bugünkü düzeyine yükselmiştir. Böylece, oksijenle aşırı yüklenmiş bu uyarıcı yeni ortamda, avcılıkla yaşayan büyük hayvanlar gezegenin tarihinde ilk kez mümkün hale gelmiştir.

Buraya kadar her şey iyi. Ama düzgün gözler Kambriyen öncesinde yoksa, sorumuz daha da kuvvetli bir biçimde yeniden karşımıza çıkar: Gözler doğal seçilimle bu kadar hızlı evrilebilir mi? 544 milyon yıl önce hiç göz yoktu, bundan dört milyon yıl sonraysa gayet gelişmiş gözler ortaya çıkmıştı. Dışarıdan bakınca, fosiller Darwin'in her biri kendi başına yararlı bir milyon incelikli basamak koşuluyla çelişiyormuş gibi görünür. Oysa aslında, bu sorun büyük ölçüde, zaman ölçeklerinin uyumsuzluğuyla, yani bir yanda aşına olduğumuz ömür süresi ve kuşakların akışı, diğer yanda jeolojik çağların ağır aksak ilerleyişi arasındaki uyumsuzlukla büyük ölçüde açıklanabilir. Yüz milyonlarca yılın yeknesak ritmiyle karşılaştırıldığında, bir milyon yıl içinde meydana gelen bir değişiklik yersizce aceleci görünmektedir; ama yine de bu bir milyon yıl, organizmaların hayatında son derece uzun bir süredir. Örneğin, bugünkü bütün köpek cinsleri, kabul etmek gerekir ki bizlerin de yardımıyla, bu sürenin yüzde biri kadar bir süre zarfında kurttan evrilmiştir.

Jeolojik açıdan bakıldığında, Kambriyen patlaması göz açıp kapayıncaya kadar geçen bir süre zarfında gerçekleşmiştir, en fazla birkaç milyon yıl içinde. Oysa evrim açısından değerlendirildiğinde, bu süre boldur: Yarım milyon yılın bir gözün evrilmesine haydi haydi yetmesi gerekir. (Şekil 7.2) Nilsson ve Pelger peş peşe gelen adımların modelini çıkarırken, gerekli olan zamanı da hesaplamışlardır. Muhafazakar bir tahminle, her adımın bir yapıda yüzde 1'den daha büyük bir değişikliğe (biraz daha derine inen bir göz küresi, biraz daha duyarlı bir mercek vs.) tekabül etmeyeceğini varsaymışlardır. Bütün adımları topladıklarında, hayretle, çıplak bir retinadan tam bir göze geçmek için 400.000 değişiklik (benim savuruverdiğim bir milyon değişiklikten o kadar da uzak değil sonuçta) gerektiğini görmüşlerdir. Sonra, her kuşakta tek bir değişiklik gerçekleştiğini varsaymışlardır. (Oysa bir seferde birkaç değişiklik birden olabilir, bu varsayım da tahmini tutucu kılınmıştır.) Son olarak bu değişimlerin gerçekleştiği "ortalama" bir deniz hayvanının yılda bir kez yavruladığını varsaymışlardır. Buna dayanarak da tam bir gözün evrilmesinin yarım milyon yıldan az süreceği sonucuna ulaşmışlardır.⁵

Bütün bu değerlendirmeler doğruysa, gözlerin belirmesi gerçekten de Kambriyen patlamasının kıvılcımını çakmış olabilir. Durum böyleyse, gözün evrimi kesinlikle, gezegen üzerinde hayatın tarihindeki en büyük ve önemli olaylar arasında sayılmalıdır.



Nilsson ile Pelger'in çıkardığı modelde sıkıntı verici bir tek adım vardır: bir merceğin oluşmasındaki ilk adım. İlkel bir mercek varsa, doğal seçilimin bunu nasıl değiştirip geliştireceğini görmek kolaydır, peki ama gerekli bileşenler en başta nasıl toplanmıştır? Bir mercek oluşturmak için gerekli çeşitli parçaların kendi başlarına bir yararı yoksa, doğal seçilimin bu parçaları daha yapım çalışmaları başlamadan törensizce gömüvermesi gerekmez mi? Bu zorluk notilusun, ona yararı olacağı halde neden bir mercek geliştirmediyi açıklayamaz mı?

Aslına bakarsanız bu soru bir yok-sorudur, en azından şimdilik notilusun bilinmeyen sebeplerden ileri gelen bir tuhaflık olarak kalması gerekiyor, çünkü çoğu tür (notilusun yaşayan en yakın akrabaları ahtapot ve mürekkebalığı da dahil), bir mercek geliştirmenin bir yolunu bulmuştur; hatta bazı türler çarpıcı derecede yenilikçi yollar bulmuşlardır. Merceğin özelleşmiş bir doku olduğu besbelliyse de, yapımı inanılmaz derecede fırsatçı bir biçimde ilerlemiş, temel yapı taşları mineraller ve kristallerden tutun enzimlere, hatta hücre parçacıklarına kadar yakındaki elverişli kaynaklardan elde edilmiştir.⁶

Trilobit böyle bir fırsatçılığın mükemmel bir örneğidir. Buz gibi gözleriyle gerçekten de sizi delip geçebilirdi, çünkü trilobitlerin göz mercekleri benzersiz bir biçimde kristallerden oluşur, kalsit mineralinden. Kalsit, kalsiyum karbonatın diğer adıdır. Kireçtaşı bu mineralin saf olmayan, tebeşirse daha saf biçimidir. Dover'daki beyaz tepeler neredeyse saf kalsittendir. Kalsit, ışığı rastgele yayan düzensiz minicik kristallerden oluşur, tebeşire de beyaz rengini bu kristaller verir. Oysa tersine, kristaller yavaş yavaş büyürse (genellikle mineral damarlarında), kalsit eşkenar dörtgen prizması olarak bilinen hafif eğik küp şeklinde, ince, kesin yapılar oluşturabilir. Bu yapıların, onları oluşturan atomların geometrisinden kaynaklanan ilginç bir optik özelliği vardır: Bir tek ayrıcalıklı eksenden gelen, doğruca ortaya vuran ışık dışında, her açıdan gelen ışığı kırarlar. Işık, c-ekseni denilen bu eksen üzerinde eşkenar dörtgen prizmaya girerse, önüne kırmızı halı serilmiş gibi hiç engellenmeden yoluna devam eder. Trilobitler bu ilginç özelliği bir avantaja çevirmişlerdir. Binlerce göz yüzeyinin her birinde bu minicik kalsit mercek ve bu ayrıcalıklı c-ekseni bulunur (Şekil 7.3). Işık her göz merceğinden sadece tek bir yönde geçerek alttaki retinaya ulaşabilir.

Trilobitlerin bu kristal mercekleri nasıl geliştirdikleri, bütün doğruları doğru yönetime nasıl sokabildikleri bilinmiyor, bu bilinmezlik büyük ihtimalle böylece kalacak, çünkü son trilobit 250 milyon yıl önce Permien tükenişi sırasında yok olup gitti. Ama trilobitlerin aradan geçen onca zamanla susturulmuş olmaları, bu-

nun nasıl gerçekleşmiş olabileceğini bilmenin hiçbir yolu olmadığı anlamına gelmiyor. 2001'de hiç beklenmedik bir kaynaktan iyi bir ipucu elde edildi. Öyle görünüyor ki trilobitlerin göz merceği, bir zamanlar düşünüldüğü kadar benzersiz değildir: Bugün mevcut bir hayvan, yılan yıldızı da görmek için kalsit mercekler kullanır.

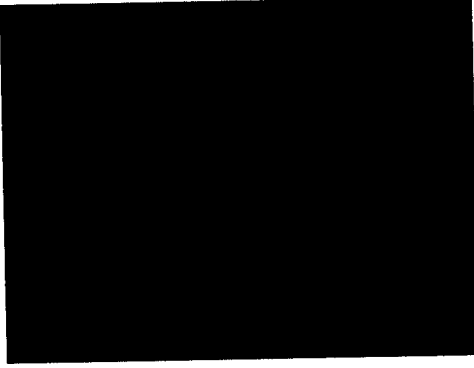
Yılan yıldızının yaklaşık 2000 türü vardır, her biri kuzenleri denizyıldızları gibi beş kollarını açar. Denizyıldızının, tersine yılan yıldızının sarkan, yukarı kaldırıldığında kopan uzun, narin kolları vardır. (İsimleri de buradan gelir, ama oğlunuz böyle bir şey yaptığında afallarsanız, yılan yıldızının kollarının yeniden gelişeceğini düşünerek kendinizi teselli edebilirsiniz.) Bütün yılan yıldızlarının iç içe geçen kalsit levhalarından oluşan iç iskeletleri vardır, avlarını yakalamak için kullandıkları kollarındaki sivri uçlar da kalsit levhalarından oluşur. Çoğu yılan yıldızı ışığa duyarlıdır, ama içlerinde bir tür, *Ophiocoma wendtii* bir avcı bir metre uzaktayken karanlık gediklere kaçarak gözlemcileri hayrete düşürmüştür. Mesele şu ki bu canlının gözleri yoktur, daha doğrusu en azından Bell Laboratuvarları'ndan bir araştırma ekibi hayvanın kollarında trilobitlerin göz merceklerine benzer kalsit topuz dizileri görünceye kadar herkes böyle düşünüyordu. (Şekil 7.4) Araştırma ekibi bu yumruların gerçekten de göz merceği işlevi gördüğünü, ışığı merceklerin altındaki ışığa duyarlı hücrelere odakladığını gösterdi.⁷ Beyin olarak tanımlayabileceğimiz herhangi bir şeyden yoksun olsa da, yılan yıldızının işlevsel gözleri vardır. *National Geographic*'in o zamanlar verdiği gibi: "Doğanın bir oyunuyla, denizin gözleri yıldızlarında."

Yılan yıldızının göz mercekleri nasıl oluşmuştur? Birçok ayrıntı henüz kayıp olsa da, geniş kapsamlı ele alındığında başka mineralleşmiş biyolojik yapılarla aynı şekilde oluşmuşlardır, tıpkı deniz kestanelerinin dikenleri gibi (o dikenler de kalsitendir). Bu süreç hücrelerin içinde başlar: Yüksek yoğunluktaki kalsiyum iyonları, proteinlerle etkileşim içine girer, proteinler onları sabit konumlara yerleştirir, böylece bir zamanlar Sovyetler Birliği'nde boş bir manavın dışında dikilen bir iyimserin bir kuyruğu başlattığı devirlerde olduğu gibi, kristal oluşumunun

nüvesini oluşturur. Bir kişi ya da bir atom hareketsiz hale gelir ve geri kalanlar ona yapışır.

Bir indirgemecilik kutlamasıyla, kalsit kristali nüvelerinin oluşturulmasından sorumlu proteinler arındırılır, bir kağıt üzerine yayılır, sonra güçlü bir kalsiyum karbonat çözeltisine yerleştirilirse, oracıkta kağıdın üzerinde mükemmel kristaller ortaya çıkar, trilobitlerin göz merceklelerinde olduğu gibi, optik c-eksenleri doğruca yukarıyı işaret eden eşkenar dörtgen prizmalar oluşur (Şekil 7.5). Bütün bunların ilk başta nasıl oluştuğuna dair bir ipucu da vardır: Tam olarak hangi proteinin tercih edildiği çok önemli değildir. Sadece proteinin asidik yan zincirlerle dolu olması önemlidir. 1992’de, yılan yıldızı mercekleri hakkında bir şeyler öğrenilmeden on yıl kadar önce, biyomineraloglar Lia Addadi ve Stephen Weiner, kesinlikle göremeyen yumuşakça kabuklarından yalıtılmış asit proteinleri kullanarak, bir kağıt üzerinde sevimli kalsit mercekler geliştirmişti. Başka bir deyişle, bu muhteşem olay, bu sürecin tamamı, yaygın bazı proteinler yaygın bazı minerallerle birleştiğinde kendiliğinden gerçekleşir. Muhteşem olduğu su götürmez, ama Meksika’daki Kılıçlar Mağarası gibi doğal mağaralarda bulunan büyüleyici kristal dizileri kadar mucizevi değildi.

Fakat bütün keskin görüşlerine rağmen, kristal gözler çıkmaz bir sokaktır. Trilobit gözlerinin asıl önemi, evrimin kalıcı bir abidesi olmak yerine, ilk gerçek gözler olarak tarihsel önemlerinden kaynaklanır. Başka yaratıklar başka doğal kristal tiplerini kullanmıştır, bu kristal tiplerinin başında da DNA’nın yapı taşlarından biri olan, ışığı odaklayabilecek yapraklar şeklinde kristalleşen guanin gelir. Guanin kristalleri balık pullarına gümüşü ışıltılarını verir, aynı gerekçeyle birçok kozmetik ürüne eklenirler, ayrıca kuşlar ve yarasaların kurumuş dışkıları olan guanoda da bulunurlar (isimleri de buradan gelir zaten). İlgili kristaller biyolojik ayna olarak işler, çoğu insan kedilerin gözlerindeki “yansıtıcılar” olarak bunlara aşinadır. Işığı retina-ya geri yansıtarak, alıcılara az bulunan birkaç fotonu yakalamak için ikinci bir şans daha vererek gece görüşünü iyileştirirler. Işığı



Şekil 7.3 Çek Cumhuriyeti'nde Bohemya'da Ordovisyen kayalarında bulunan Dalmanitina socialis'ten alınmış trilobit kristal mercekleri; merceklerin iç yüzeyinde, yaklaşık yarım milimetrelilik bir kesitteki ayrıntılar görülüyor.



Şekil 7.4 Denizyıldızı Ophiocoma wendii'nin kristal mercekleri, her kolun üzerinde eklemeleri koruyan iskeletsel plakaların üzerinde bulunurlar.



Şekil 7.5 Eşkenar dörtgen prizması şeklindeki kalsit kristalleri; kabuklu yumuşakçalardan alınan asidik proteinlerle sıvanmış, güçlü bir kalsiyum karbonat çözeltisine yerleştirilmiş kağıt üzerinde gelişmişler. Optik c-ekseni, ışığın kristalden dağılmadan geçebileceği tek istikamet yukarıyı gösteriyor.

retinaya odaklayarak bir görüntü oluşturan başka aynalar da vardır. Bunlar arasında deniztaraklarında, kabukların kenarındaki dokunaçların arasından çıkan çok sayıda güzel göz de yer alır; deniztarakları ışığı odaklamak için retinanın altındaki içbükey bir aynayı kullanır. Deniztekesi, karides ve istakozlar dahil birçok kabuklunun bileşik gözleri de guanin benzeri doğal kristalleri kullanarak ışığı odaklayan aynalara dayanır.

Ama genel olarak bakıldığında, evrimin en büyük zaferleri ve ana itici gücü bizimki gibi, özelleşmiş proteinlerden oluşan göz mercekleri olmuştur. Acaba bunlar da bedene başka yararları olan mevcut bileşenlerden toparlanmış fırsatçı yapılar mıdır? Zaman zaman evrimin tarihsel bir bilim olduğu, şu ya da bu şekilde kanıtlanamayacağı ileri sürülse de, aslında evrim sınanabilecek çok özel tahminlerde bulunur. Bu örnekte evrim kuramı, uzmanlaşmış mercek proteininin merceğin var olması öncesinde evrilmesinin mümkün olamayacağı gerekçesine dayanarak, göz merceği proteinlerinin bedene başka yararları da olan mevcut proteinler arasından alınması gerektiği tahmininde bulunur.

İnsan gözünün merceği besbelli ki son derece uzmanlaşmış bir dokudur: Şeffaftır, kan damarları yoktur, hücreler normal özelliklerinin hemen hepsini kaybetmiştir, normal işleri yerine proteinleri yoğunlaştırıp sıvı bir kristal dizilim haline getirirler; bu kristal dizilim, ışığı bükerek retinada açık bir görüntü oluşturabilir, alanın derinliğini değiştirmek için şekil de değiştirebilir. Üstelik ışığın ne ölçüde kırıldığı, merceğe göre farklılık gösterir, bu yüzden göz merceğinin merkezinden ya da kenarından geçen ışığın farklı noktalara odaklandığı sferik aberrasyon (küresel hata) gibi hatalar olmaz. Bütün bunlar dikkate alındığında, böyle incelikli bir dizilim üretmek için gerekli proteinlerin benzersiz olacağı, gündelik olağan proteinlerde bulunmayan optik özelliklere sahip olacağı çıkarımında bulunabiliriz. Ama böyle bir çıkarımda bulunursak, tümüyle yanılıyor oluruz.

İnsanın göz merceğinde bulunan proteinlere kristalin denir, gerçekten de benzersiz özelliklere sahip oldukları beklentisiyle onlara bu isim verilmiştir. Kristalinler göz merceğindeki prote-

inlerin yaklaşık yüzde 90'ını oluştururlar. Göz mercekleri, farklı türlerde hem görünüşleri hem işlevleri bakımından bu kadar benzer olduğundan, hepsinin benzer bir proteinden oluştuğunu varsaymak mantıklı görünür. Fakat farklı proteinlerde yapı taşları dizilimini karşılaştırmaya yönelik tekniklerin 1980'lerin başından itibaren yaygın olarak elverişli hale gelmesiyle birlikte, gerçek anlaşılmış ve büyük bir şaşkınlık uyandırmıştır. Kristalinler yapısal proteinler *değillerdir*, hatta çoğu göz merceğine özgü bile değildir; hepsi de bedenin başka yerlerinde görülen başka işleri yapar. Daha da beklenmedik bir başka şeyse, birçok kristalinin bedenin başka yerlerde normal “ev işleri”yle uğraşan enzimler (biyolojik katalizörler) olduğunun anlaşılmış olmasıdır. Örneğin, insan gözünde en bol bulunan kristaline α -kristalin denir, bu kristalin ilk kez *Drosophila* adlı meyve sineğinde bulunan, bugün hayvanlarda yaygın olduğu öğrenilen bir stres proteiniyle ilgilidir. Bir “refakatçi” gibi davranır, yani başka proteinleri hasardan korur. Böyle olduğu için de sadece gözde değil, beyinde, karaciğerde, akciğerde, dalakta, deride ve ince bağırsakta da bulunur.

Bugüne kadar 11 kristalin tipi sınıflandırılmıştır, bunlardan sadece üçü bütün omurgalıların gözlerinde bulunur, geri kalanlar gruptan gruba farklılık gösterir; bu durum, yine tahmin edildiği üzere doğal seçilimin *ad hoc* yaklaşımı uyarınca, bu kristalinlerin göz merceğinde çalışmak üzere hayli bağımsızca “işe alındığı”nı düşündürmektedir. Bu enzimlerin isimleri ya da işlevleri üzerinde durmayacağız. Ama her biri hücrede ayrı bir görev üstlenen bu metabolik protein grubunun koparılıp tümüyle farklı bir işe koşulması sarsıcıdır. Sanki ordu, orduyu oluşturmak için sadece zanaatkarları ve esnafları askere almış gibidir. Ama sebebi ne olursa olsun bu ilginç politikada, mercek proteinlerini işe almanın özellikle zor olduğunu düşündürecek bir şey yoktur.

Neresinden bakılırsa bakılsın, göz merceği proteinlerinde özel bir şey yoktur: Tıpkı zorunlu askerler gibi, bedenin başka yerlerinden alınmışlar, işe koşulmuşlardır. Hemen hemen bütün proteinler şeffaftır, dolayısıyla renk önemli değildir. (Sadece he-

moglobin gibi pigmentlerle eşleşen proteinler kendilerine özgü bir renge sahiptir.) Işığın mercekte kırılma derecesi gibi optik özellikler, protein yoğunluğunun değiştirilmesiyle sağlanır, bu da büyük bir incelik gerektirir, orası su götürmez, ama o kadar da büyük bir kavramsal engel değildir. Mercek proteinlerinin bu kadar büyük bir bölümünün enzim olmasının bir gerekçesi varsa bile, bu gerekçe henüz bilinmemektedir; ama bu gerekçe ne olursa olsun, mükemmel bir biçimde oluşmuş göz merceği proteinlerinin Zeus'un başından fırlayıp çıkmadığı açıktır.

Deniz fiskiyesi (*Ciona intestinalis* ya da kelimesi kelimesine "bağırsak sütunu"; anlaşılan o ki Linnaeus da pek o kadar in-safı olmamıştır) gibi pespaye bir ismi olan aşağı bir omurgalı, bütün bunların nasıl ortaya çıktığına bir pencere aralar. Deniz fiskiyesinin yetişkin biçimi, aldığı mirası pek göstermez, esasen bir kayaya bağlı şeffaf bir torbadır, salınan sarımsı iki sifonunun birinden giren su öbüründen çıkar. Britanya sahil şeridinde o kadar sık görülürler ki bunlara musibetten başka bir şey gözüyle bakılmaz pek. Ama larvalar fiskiyenin derin sırrını gözler önüne serer, onların musibetten fazlası olduklarını gösterir. Deniz fiskiyesi larvaları biraz iribaşa benzer, ilkel bir sinir sistemi ve mercekleri olmayan ilkel gözler kullanarak yüzerler. Minik fiskiye kendisine uygun bir yuva bulduğunda, kendisini sıkı sıkıya oraya bağlar ve artık ihtiyacı olmadığı için kendi beynini yeniden özümser. (Steve Jones'un esprisine bakılırsa, üniversite profesörleri arasında büyük hayranlık uyandıran bir ziyafettir bu.)

Yetişkin deniz fiskiyesinin bizimle ilgili herhangi bir şeyle ilişkilendirilmesi mümkün olmasa da, iribaş larva her şeyi haber verir: Deniz fiskiyesi ilkel bir kordalıdır (sırtiplikli), yani omurganın öncüsü olan bir omuriliğe sahiptir. Bu onu, kordalıların, dolayısıyla bütün omurgalıların ilk kolları arasına yerleştirir. Aslında göz merceğinin evrimi öncesinde omurgalılardan ayrılmıştır. Bu da demektir ki deniz fiskiyesi o basit gözüyle, omurgalıların göz merceklerinin nasıl oluştuğuna dair bir fikir verebilir.

Verir de. 2005'te Oxford'da Sebastian Shimeld ile meslektaşları *Ciona intestinalis*'in göz merceğinden yoksun olsa da son de-

rece iyi bir kristalin proteinine sahip olduğunu buldu, gözünde değil, beyindeydi bu protein. Kimbilir o beyinde neler oluyor-
dur, ama burada bununla ilgilenmiyoruz. Burada önemli olan,
omurgalıların göz merceği oluşumunu yönlendiren genlerin bu
proteinin faaliyetini de kontrol ediyor olmasıdır, deniz fiskiye-
sinde bu genler gözde olduğu kadar beyinde de işler. Dolayısıyla
bir mercek oluşturmak için gerekli araç, omurgalılar ve deniz
fiskiyelerinin yolları ayrılmadan önce ortak atalarında mevcuttu.
Omurgalıların, düzenlemedeki küçük bir değişiklik bu protei-
ni beyinden göze aktarmıştır. Bazıları omurgalıların atalarında,
bazıları daha yakın dönemde belli gruplarda rastlanan benzer
devşirme akınları, bedeninin başka yerlerindeki kristalinlerin tek-
rar tekrar işe koşulmasını açıklayabilir herhalde. Deniz fiskiyesi
kolunun kaynakların kullanımında neden basit bir değişiklik ya-
pamadığı, sırrını korumaktadır; herhalde mercek olmasa da bir
kaya bulmak o kadar zor değildir. Hal böyleyken, deniz fiskiyesi
tuhastır: Çoğu omurgalı mercek oluşturmayı başarmıştır, en az
11 kez olmuştur bu.



Çeşitli türlerin göz merceklerini oluşturan bu devşirilmiş prote-
inler, kristaller ve mineraller curcunasında retinanın proteinleri
çarpıcı bir tezat sergiler. Özellikle de bir protein öne çıkar: ışığı
hissetmekle sorumlu molekül, rodopsin. Yarık karidesi *Rimica-
ris exoculata*'yı, çıplak retinalarını hatırlarsınız. Derin okyanus
menfezleri dünyasının kendisine has tuhaflığına, sırtındaki çıp-
lak retinaların acaipliğine, biz seçemezken bu karidesin solgun
bir pırlıltıyı tespit edebilme becerisine, sülfür bakterisiyle yaşa-
masına, kanının mavi olmasına, bir omurgası olmamasına, bi-
zimle son ortak atası Kambriyen patlamasından çok önce, yakla-
şık 600 milyon yıl önce yaşamış olmasına rağmen; yarık karide-
si, görmek için bizimle aynı proteini kullanır. Zamanı ve mekanı
aşan bu derin bağlantı, tekinsiz bir tesadüften mi ibarettir, yoksa
daha başka bir anlamı mı vardır?

Karidesteki ve bizdeki proteinler tam olarak aynı değildir,

ama birbirlerine o kadar benzerler ki mahkemeye çıkıp da bir yargıcı sizdeki versiyonun üstü pek örtülememiş bir kalpazanlık olmadığına ikna etmeye çalışsanız, kazanma ihtimaliniz çok düşük olurdu. Aslına bakarsanız, alay konusu olurdunuz, çünkü rodopsin sadece yarık karidesleri ve insanlarla sınırlı değildir, hayvanlar aleminin her yerinde karşımıza çıkar. Örneğin, trilobitin gözünün iç işleyişine dair pek az şey biliyoruz, kristal göz mercekleriyle birlikte bu iç işleyiş korunmamıştır, ama akrabaları hakkında bildiklerimize dayanarak, trilobitin gözlerinde rodopsin olduğunu kesin bir biçimde söyleyebiliriz. Dikkat çekici birkaç istisna dışında bütün hayvanlar tam olarak aynı proteine dayanır. Bir yargıcı sizdeki rodopsinin kopya olmadığına ikna etmeye çalışmak, televizyonunuzun sırf daha büyük ya da düz bir ekranı olduğu için herkesin televizyonundan farklı olduğunu iddia etmeye benzer.

Bu dikkat çekici uyumun birkaç yoldan ortaya çıkmış olabileceği düşünülebilir. Herkes, ortak bir atadan miras aldığı için aynı proteini kullanıyor olabilir, bu veri bu anlama gelebilir. Son 600 milyon yıl içinde birçok küçük değişiklik geçirmiştir, ama besbelli ki bu aynı proteindir. Bu veri, ışığı tespit etme yetisine sahip moleküllerde çok ciddi tasarım sınırlamaları olduğu, öyle ki herkesin temelde aynı şeye sahip olmaya mecbur kaldığı anlamına da gelebilir. Bilgisayar ekranında televizyon seyretmek misali farklı teknolojilerin benzer bir çözümde birleşmesi vakasıdır. Ya da elimizdeki veri, son olarak, bu molekülün kalıtım yoluyla değil de apaçık bir hırsızlıkla bir türden diğerine serbestçe aktarıldığı anlamına gelebilir.

Üçüncü seçeneği kolayca eleyebiliriz. Türler arasında gen hırsızlığı mevcuttur (örneğin genler viral enfeksiyonlarla taşınır) ama bakteriler dışında yaygın değildir, böyle bir şey olduğunda da şişmiş bir parmak gibi kendini hemen belli eder. Çeşitli türlerde proteinler arasında gözlenen önemsiz farklılıkların listesi, türler arasında bilinen ilişkilerle örtüştürülebilir. İnsan proteini çalınmış ve bir yarık karidesine nakledilmiş olsaydı, karidesten çok insanlarla akraba yasadışı bir yabancı gibi gözümü-

zün önünde olurdu. Öte yandan, eğer bu farklılıklar karidesin atalarında zaman içinde tedricen birikmiş olsaydı, bu durumda karidesteki protein, karidesin yakın akrabaları deniztekeleri ve istakozlardaki proteine daha benzer, bizim gibi uzak akrabalarındaki proteinden daha farklı olurdu. Zaten durum da aynen böyledir.

Rodopsin çalınmadıysa, mühendislik zorunlulukları yüzünden yeniden mi icat edilmiştir? Buna kesin bir cevap vermek daha zordur, çünkü bir kereliğine bile olsa gerçekten de yeniden icat edildiği hissi alırız. Yarık karidesindeki rodopsin, bizdeki rodopsinden mümkün olabileceği kadar uzaktır, bunun da sebebi, birbirine çok benzer iki moleküldür. Bu iki molekül arasında bir ara formlar yelpazesi yer alır, ama bu yelpaze o kadar büyük bir süreklilik göstermez. Aksine, kabaca bir yanda omurgalıları, bir yanda (karidesimiz de dahil) omurgasızlara tekabül edecek şekilde iki gruba ayrılır. Karşıtlarla dolu bir bağlam bu farklılığı büyütür. Her iki durumda da ışığa duyarlı hücreler, değişmiş sinir hücreleridir, ama benzerlik bu noktada son bulur. Karideslerde ve başka omurgasızlarda, rodopsin hücrenin tepesinden diken diken olmuş tüyler gibi fırlayan zarlara (mikrovillere) bağlanır. Omurgalılarıdaysa, hücrenin tepesinden bir radyo vericisi gibi tek bir çıkıntı fırlar (Şekil 26). Bu çıkıntı kıvrılarak bir dizi derin yatay katman oluşturur, böylece hücrenin tepesinde duran bir disk yığını gibi görünür.

Fotoreseptör hücrelere baktığımızda, bu farklılıkların biyokimyadaki karşılıklarını görürüz. Omurgalılarda, ışık emildiğinde bir sinyaller silsilesi hücrenin zarına yayılan elektrik yükünü güçlendirir. Omurgasızlarsa bunun tam tersini yapar: Işık emildiğinde tümüyle farklı bir silsile zarın elektrik yükünü tamamen kaybetmesine yol açar, sinirin beyne "Işık!" mesajını göndermesine neden olan da budur. Sözün kısası, tümüyle zıt hücre tiplerinde birbirine epey benzer rodopsinler bulunur. Peki bütün bunlar fotoreseptör hücrelerin iki kere, bir kere omurgasızlarda, sonra bir de omurgalılarda evrildiği anlamına gelir mi?

Hiç kuşku yok ki bu en akla yatkın cevapmış gibi geliyor,

bu alanda çalışan çoğu bilim insanı da 1990'ların ortasına kadar buna kesinlikle inanıyordu, ama sonra birden her şey değişti. Olguların hiçbirinde yanlışlık yoktu, sadece hikayenin ancak yarısını oluşturdukları anlaşıldı. Şimdiyse, herkes ortak bir atadan miras aldığı için rodopsin kullanıyormuş, yani gözün ilk öncülü sadece bir kez evrilmiş gibi görünüyor.

Basel Üniversitesi'nde çalışan, İsviçreli yenilikçi gelişim biyoloğu Walter Gehring bu düzeltmeyi en kuvvetle savunan bilim insanı oldu. Vücut planının belirlenmesinden sorumlu genleri keşfedenler arasında yer alan Gehring, 1995'te biyolojinin en hayret verici deneylerinden birini yürüterek anıtsal nitelikte ikinci bir keşif yaptı. Gehring'in ekibi bir fareden alınan bir geni meyve sineği *Drosophila*'ya yerleştirdi. Toplulukta küçük bir rolü olan sıradan bir gen değildi bu: Onun kötücül rehberliğiyle meyve sineği birden bacaklarında, kanatlarında, hatta antenlerinde göz çıkarmaya başladı, tam gözlerdi bunlar (Şekil 7.6). Tuhaf yerlerden çıkıveren bu tuhaf, minik gözler fareler ve insanlarda görülen kamera gözler değildi, böcekler ve kabuklulara özgü özellikler yelpazesinin görüldüğü bileşik gözlerdi. Bu ürkütücü deneyin iç organları buruveren bir kuvvetle kanıtladığı şey şuydu: Bir farede ve bir sinekte gözün gelişmesi için gerekli genler aynıydı, 600 milyon yıllık evrim tarihi boyunca, omurgalılar ve omurgasızların son ortak atalarından beri inanılmaz bir sadakatle korunmuşlardı, o kadar ki yer değiştirebiliyorlardı. Fare genini bir sineğe yerleştirdiğinizde, yerleştirildiği yer neresi olursa olsun, sineğin sistemlerine hakim oluyor, kendisine tabi olan sinek geni hiyerarşisine oracıkta bir göz yapmaları talimatı veriyordu.

Nietzsche bir zamanlar Basel'de ders vermişti, ona hürmetinden olacak, Gehring fare geninden "efendi gen" diye bahsetmişti. "Maestro gen" daha mı uygun olurdu acaba merak ediyorum; o kadar tumturaklı olmadığı kesin, herhalde daha da çoğulcu bir tınısı olurdu. Tek bir nota bile seslendirmeksizin çok güzel bir müzik ortaya çıkaran bir orkestra şefi gibi, fare geni de her biri ayrı bir rol üstlenmiş tek tek oyuncularını sahneye davet ederek

gözün yapılarını ortaya çıkarır. Aynı genin farklı versiyonları sinekler, fareler ve insanlardaki mutasyonlarıyla zaten tanınıyordu. Fareler ve sineklerde bu gene sırasıyla *Küçük Göz* ve *Gözsüz* deniyordu, genetikçilerin korkunç derecede yatkın olduğu bir tersine çevirmeyle genin yokluğundaki kusurun ölçüsünü ifade ediyordu bu isimler. İnsanlarda, aynı gendeki mutasyonlar irisin gelişme gösteremediği aniridi hastalığına neden olur, sıklıkla körlükle sonuçlanan bu nahoş hastalık, gözün bütün yapısını denetlediği varsayılan efendi bir genin ortaya çıkarabileceği ilginç denecek kadar sınırlı bir sonuçtur. Ama genin sadece bir kopyası hasarlıysa bu hastalık ortaya çıkar. İki kopya da hasarlıysa ya da kaybolmuşsa başın tamamı gelişmez.

Gehring'in çığır açan deneyinden bu yana bu tablo daha da karmaşık bir hal almıştır. "Efendi gen" artık *Pax6* olarak bilinmektedir, yüce makamında görüldüğünden hem çok daha güçlü hem daha az yalındır. O zamandan beri *Pax6*'nın karidesimiz de dahil hemen hemen bütün omurgalılar ve omurgasızlarda bulunduğu anlaşılmıştır, hatta denizanasında onunla yakından ilişkili bir gen bulunmuştur. Öyle görünüyor ki *Pax6* sadece gözlerin değil, beynin geniş kısımlarının oluşumunun da ardındaki gendir, bu yüzden bu genin her iki kopyasının birden yok olması halinde başın gelişmesi söz konusu olmamaktadır. Ayrıca *Pax6* yalnız değildir, diğer genler de *Drosophila*'da tam göz çıkarabilir; aslına bakılırsa bu tuhaf bir biçimde kolay bir iş gibi görünmektedir. Bu genlerin birbirleriyle ilişkili ve çok eski oldukları açıktır. Çoğu hem omurgasızlarda hem omurgalılarda bulunur, gerçi rolleri ve bağlamlarında çok hafif farklılıklar görülür. Malesef hayatın güzel müziğini ortaya çıkaran bir orkestra şefi değil, küçük bir komitedir.

Varılan sonuç şudur: Aynı gen komitesi hem omurgalılarda hem omurgasızlarda gözlerin oluşumunu kontrol eder. Rodopsinin tersine, aynı genlerin bu süreci kontrol etmesini gerektirecek pratik bir "mühendislik" gerekçesi yoktur; bu genlerin hepsi de yüzleri tanınmayan bürokratlardır, yüzleri tanınmayan başka bir bürokratlar grubu da aynı işi yapabiliirdi. Gerçek şudur ki



Şekil 7.6 Bir meyve sineğinin (*Drosophila*) başının elektron mikrograf taraması; antenlerin üzerinde bir farenin Pax 6 geninin genetik mühendislik yoluyla eklenmesiyle oluşmuş küçücük fazladan bir göz görülüyor. Aynı gen hem omurgalılar hem omurgasızlarda gözlerin gelişimini kontrol eder, yaklaşık 600 milyon yıl önce ortak atamızda da aynı işi görmüş olmalıdır.

hep aynı ekip (örneğin lens proteinlerinin tersine) tarihin elini, zorunluluğun kuvvetinden ziyade rastlantının tuhaflığını gözler önüne serer. Bu tarih de fotoreseptör hücrelerin omurgalılar ve omurgasızların ortak bir atasında sadece bir kez, küçük bir gen komitesinin kontrolünde evrildiğini düşündürmektedir.

Fotoreseptörün sadece bir kez evrildiğine inanmamızı sağlayacak başka bir gerekçe daha vardır, yaşayan bir fosilin doğrudan tanıklığı. Bugüne ulaşmış bu canlı, sert kıllarla kaplı, birkaç milim uzunluğunda minicik bir deniz yaratığı olan *Platynereis*'tir. İnsan, balık tutanların rağbet ettiği bir yem olan bu bataklık nehir ağzı sakinine bakarken, onun genel şekli ve morfolojisinin Kambriyen Devri'nden beri değişmediğini kaç kişinin bildiğini merak ediyor. Omurgalılar ve omurgasızların ortak atası buna benzer bir kurtçuktu. Bütün omurgalılar ve birçok omurgasız gibi, bu yaratığın bedeninde bir simetri vardır: Bir denizyıldızının tersine, her iki tarafı da aynıdır. Bu simetri hepimizi, beni ya da sizi olduğu kadar bir böceği de simetrik yapar. Kritik önemde bir nokta şudur ki *Platynereis*, potansiyele gebe bu tasarımın patlayıp çevremizde gördüğümüz muhteşem tezahürleri ortaya çıkarmasından önce evrilmiştir, bedeni simetrik ilk hayvanın

yaşayan bir fosilidir. Heidelberg'te Avrupa Moleküler Biyoloji Laboratuvarı'nda çalışan Detlev Arendt ve meslektaşları işte bu yüzden onun fotoreseptör hücreleriyle ilgilenmektedir.

Arendt ve ekibi, *Platynereis*'in gözlerinin tasarımı itibarıyla, kullanılan rodopsin tipine varıncaya kadar omurgalılarından ziyade omurgasızların gözlerine benzediğini biliyorlardı. Ama 2004'te Heidelberg ekibi hayvanın beynine gömülmüş başka bir ışık reseptörü grubu keşfetti. Bunlar görmek için değil, uykuyu ve uyanıklığı yöneten, bakterilerde bile geceyi gündüzden ayırmaya yarayan iç ritimler, biyolojik saat için kullanılıyordu. Biyolojik saat hücreleri rodopsin kullanmakla kalmıyorlardı, omurgalı fotohücreleri oldukları da hemen anlaşılıyordu (en azından Arendt gibi uzmanlarca); bu tanım daha sonra daha ayrıntılı biyokimyasal ve genetik testlerle de doğrulandı. Arendt bedensel simetriye sahip ilk hayvanın her iki fotohücre tipine de sahip olduğu sonucuna vardı. Bu da bu iki tipin tümüyle farklı yönlerde bağımsız olarak evrilmediği, aynı organizmada, hayvanın bir atasında bir arada evrilen "kardeş" hücreler olduğu anlamına geliyordu.

Elbette ki omurgalılar ve omurgasızların bu ortak atası her iki tip fotohücreye de sahipti, o halde her ikisini de kalıtımla miras almış olabilirdik, sadece nereye bakacağımızı bilmemiz gerekiyordu. Öyle görünüyor ki biliyorduk da. Yaşayan fosilin sırlarını ele vermesinden bir yıl sonra, San Diego'da Salk Enstitüsü'nde Satchin Panda ve meslektaşları biyolojik saati etkileyen bazı göz hücreleriyle (retinal ganglion hücreleri) ilgili bir önsezinin peşinden gittiler. Bu hücreler ışık tespitinde uzmanlaşmamış olmalarına rağmen onlarda da rodopsin vardı. Rodopsinin melanosin olarak bilinen olağandışı bir biçimiydi; anlaşıldığı üzere omurgasız fotohücrelerinin bir özelliği idi. Dikkat çekicidir ki gözlerimizde biyolojik saatle ilgili bu rodopsin, yapısı itibarıyla yarık karidesinin çıplak retinalarında bulunan rodopsine, insan retinasında bulunan diğer rodopsin tipinden daha yakındı.

Bütün bunlar, omurgalı ve omurgasız fotohücrelerinin tek bir kaynaktan doğduğu anlamına gelir. Bu fotohücreler ayrı icatlar degillerdir, ortak bir anaları olan kardeş hücrelerdir ve o ana

hücre, o ilk fotohücre, bütün hayvan gözlerinin atası sadece bir kez evrilmiştir.

İşte ortaya çıkmakta olan büyük tablo budur. Görsel pigment rodopsini içeren, ışığa duyarlı tek bir hücre tipi, küçük bir gen komitesinin kontrolü altında, omurgalılar ve omurgasızların ortak bir atasında evrilmiştir. Daha sonra, ışığa duyarlı bu hücreler kopyalanmıştır, iki yavru hücre ya gözlerde ya da biyolojik saatte işlemek üzere uzmanlaşmıştır. Belki de şanstın öteye gitmeyen sebepleri yüzünden, omurgalılar ve omurgasızların her biri, bu işler için birbirine karşıt hücre tipleri seçmiştir, böylece gözler her ikisinde farklı dokulardan gelişmiş, bu da örneğin insanda ve ahtapotta benzer gözler için çok büyük embriyonik farklılıkların doğmasına yol açmıştır. Tam göze giden yolda ilk durak noktası çıplak bir retinaydı: geldiği soya, omurgalı ya da omurgasız olmasına bağlı olarak ışığa duyarlı iki hücre tipinin birinden oluşan, ışığa duyarlı bir hücre tabakası. Bazı organizmalarda hâlâ basit, düz çıplak retinalar görülür, bazılarındaysa bu tabaka göz çukuruna gömülmüştür, bir gölgeyi ayırt edebilir ve ışığın nereden geldiğini hissedebilir. Bu göz çukurları derinleştikçe, duyarlılık ile çözünürlük arasındaki pazarlık, herhangi tipte bir merceğin hiç mercek olmamasından daha iyi olduğu anlamına gelmeye başlamıştır; minerallerden tutun enzimlere kadar her tür beklenmedik materyal bu işe koşulmuştur. Farklı soylarda benzer bir süreç işlemiş, bir göz merceği tipleri kakafonisi ortaya çıkmıştır; ama işlevsel bir göz yapmanın önündeki optik sınırlar, moleküler düzeydeki bu çeşitliliği bizimki gibi kamera gözlerden tutun böceklerin bileşik gözlerine varıncaya kadar küçük bir büyük ölçekli yapılar yelpazesıyla sınırlı tutmuştur.

Elbette ki doldurulması gereken sayılamayacak kadar çok ayrıntı vardır, ama gözün evriminin hikayesi kaba hatlarıyla böyledir. Yarık karidesiyle aynı rodopsini paylaşmamızda hayret edecek bir şey yok, o rodopsini hepimiz, aynı ortak atadan miras aldık. Ama bu durum bizi yine büyük bir soruyla karşı karşıya bırakıyor, bu bölümü bitirirken o soruyu soralım: Kimdi bu ata? Bu sorunun da cevabı yine genlerde yatmaktadır.



Cindy Van Dover derin deniz menfezlerinde ışıktan yana kaygılıydı. Yarık karidesi, bizim gözümüzdekine benzer bir rodopsin kullanarak yeşil ışığı olağandışı bir duyarlılıkla tespit edebiliyordu; ama yine de ilk ölçümler menfezlerin yeşil ışıltılar saçmadığını gösteriyordu. Neler oluyordu peki?

Ünlü bir araştırmacı, emekliye ayrılırken yaptığı bir konuşmada genç bilim insanlarına biraz nükteli bir tavsiyede bulunarak, başarılı bir deneyin hiçbir şekilde tekrarlanmaması gerektiğini söylemişti, zira sonucun beter bir hayal kırıklığı olacağına kesin gözüyle bakılabiliirdi.⁸ Tersi de geçerlidir, ama o kadar açık değildir: Asla bir hatayı tekrarlamaktan kaçınmayın. Ne var ki Van Dover'ın haklı bir sebebi vardı. Tıpkı ölü bir insan gibi, rodopsin de genellikle yalan söylemez. Van Dover, rodopsin yeşil ışık emiyorsa, oralarda emilecek bir yeşil ışık olduğunu düşünmüştü. Çok muhtemel ki ilk çalışmalarda kullanılan kaba saba aygıtlar, bir karidesin çıplak retinası kadar duyarlı değildi.

NASA'da görev yapan, dış uzayın zifiri karanlığında ışıınım tespit etme konusunda her şeyi bilen uzaybilimcilere yeni ve çok daha sofistike bir fotometre ısmarlandı. ALISS (Ambient Light Imaging and Spectral System) adını taşıyan bu aygıt, başka dalga boylarındaki ışığı tespit edebiliyordu. ALISS'in deniz altındaki seyri, menfezler dünyasının harikalar diyarında ışıınım tayfının yeşil kısmında, kurama dayanarak tahmin edilenden kat kat daha büyük bir yoğunluk gösteren küçük bir zirve oluştuğunu tespit etti. Yeni ölçümler çok geçmeden başka menfezlerden elde edilen verilerle de doğrulandı. Bu ürkütücü yeşil ışıltının kaynağı hâlâ meçhul olsa da, egzotik varsayımlar konusunda hiç kıtlık çekilmez. Sözgelimi, menfezlerden çıkan ve okyanusun yüksek basıncı altında patlayan küçük gaz baloncukları görünür bir ışığa yol açabilir, kristallerin ısı ve basınç altında oluşumu ve çatlaması da öyle.

Van Dover'ın rodopsine inancı gayet yerindeyse de, kendisi sadece şansını deniyordu. Rodopsinin koşulların izini sürme ko-

nusunda inanılmaz bir becerisi vardır. Derin mavi denize “derin mavi” denir, çünkü mavi ışık suda başka dalga boylarından çok daha fazla ilerler. Kırmızı ışık suda kısa sürede emilir, pek uzağa ulaşamaz; sarı ışık biraz daha ileri gider, turuncu biraz daha. Ama yirmi metreden aşağıda ışığın çoğu yeşil ve mavidir, derinlikle birlikte daha da mavileşir. Mavi ışık etrafa yayılır, okyanusun derinindeki her şeye mavi bir ton verir. Balıkların rodopsin pigmentleri bu mavi değişikliğe incelikle, spektral ayar diye bilinen bir numarayla uyar. Dolayısıyla yaklaşık 80 metre aşağıda, rodopsinleri yeşil ışığı en iyi (yaklaşık olarak 520 nm) emen balıklara rastlarız, ama 200 metre aşağıya indiğimizde, ışığın sönmekte olan son kıvılcımlarında balıklarda mavi ışığı emen rodopsinler olduğunu buluruz. İlginçtir, daha önce karşılaştığımız baca yengeci *B. therydron* oyuga yerleşirken bu değişikliği tersine çevirir. Bu yengecin larvaları derin mavi sularda yaşar ve retinasındaki rodopsin en iyi, 450 nm dalga boyunda mavi ışığı emer. Oysa tersine, yetişkin yengecin çıplak retinasındaki rodopsin 490 nm dalga boyunda, yeşile yakın mavi ışığı emer. Değişiklik küçüktür, ama kesindir. Yarık karidesinin retinasındaki rodopsinin de 500 nm dalga boyundaki yeşil ışığı emdiği dikkate alınırsa, Van Dover’ın antenlerinin titremesi için her sebep mevcuttu.

Bizim renkli görüşümüz, rodopsinin dalga boyları arasında değişim yapabilme becerisine dayanır. Retinamızda iki tip fotoreseptör vardır: çubuklar ve koniler. Kesin terimlerle ifade edecek olursak, sadece çubuk hücrelerde rodopsin vardır, konilerdeyse üç tane “koni opsini”nden biri bulunur. Ama gerçekte bu ayrımın bir yararı yoktur, çünkü bu görsel pigmentlerin hepsi de temelde yapısal olarak aynıdır: Hepsi de belli bir protein türünden, zarın üstüne yedi katlı bir zikzakla yerleşmiş olan bir “opsin”den oluşur, bu opsin A vitamininin retinal denilen bir türevine bağlıdır. Retinal bir pigmenttir, öyle olduğu için de ışığın emilmesinden sorumlu tek parçadır. Retinal bir foton emdiğinde, dirsekli olan şekli değişip düz bir biçim alır, bu da sonunda beyne “Işık!” sinyalinı gönderen bütün bir biyokimyasal silsileyi harekete geçirmeye yeterlidir.

Işığı emen retinal olsa da “spektral ayar” için en önemli etken, opsin proteininin yapısıdır. Yapıdaki küçük değişimler opsinin emilimini böcekler ve kuşlarda ultraviyoladan (yaklaşık 350 nm) bukailemunlarda kırmızıya (yaklaşık olarak 650 nm) değiştirir. Dolayısıyla birbirinden biraz farklı, her biri farklı bir emilimi olan birkaç opsinin birleşmesiyle renkli görüş mümkün olur. Bizim koni opsinlerimiz ışığı en fazla tayfin mavi (433 nm), yeşil (535 nm) ve kırmızı (564 nm) kısımlarında emer, hep birlikte bildiğimiz görüş mesafesini verirler.⁹

Opsinler genel yapıları itibarıyla geniş kapsamlı bir benzerlik gösterebilir de, aralarındaki farklılıklar büyüleyici bir hayat hikayesini ortaya döker. Hepsi de kopyalamayla oluşmuş, bunu farklılaşma izlemiştir, hepsinin de izi sürülüp bir opsin geninin atasına ulaşılabilir. Açıkır ki bu kopyalamalar bazılarında diğerlerine kıyasla daha yakın zamanda ortaya çıkmıştır. Örneğin, bizim “kırmızı” ve “yeşil” opsinlerimiz yakından ilişkilidir: Bu gen, primatların ortak bir atasında kopyalanmıştır. Bu kopyalama primatlara (ya da birbirlerinden biraz farklılaşmaları sonrasında), iki yerine üç tip koni opsin kazandırmış, böylece çoğumuzun üç renkli (trikromatik) görüş gücüne sahip olmasını sağlamıştır. Kırmızı-yeşil renk körü olan bazı talihsizler, bu genlerden yine bir tanesini kaybetmiş, bu yüzden diğer memelilerin hemen hepsi gibi dikromatik olmuşlardır; bu kötü görüşleri, muhtemelen dinozorlardan saklanmakla geçen nispeten yakın karanlık bir geçmişi yansıtmaktadır. Primatların neden üç renkli görüşü yeniden kazandığı tartışmalıdır. En popüler kuram, üç renkli görüşün yeşil yapraklar arasında kırmızı meyveleri seçmeye yardımcı olduğunu ileri sürer; daha toplumsal yönelimli alternatif bir fikirse, üç renkli görüşün yüzün kızarmasından tutun, yüzünüzce söylenen yalanlara kadar duyguları, tehditleri ve cinsel sinyalleri ayırt etmeye yaradığını savunur. (Bütün trikromatik primatların yüzünün çıplak olması da ayrıca ilginçtir.)

Primatların üç renkli görüş yeteneğini “yeniden kazandığı”nı söyledim, ama aslında diğer omurgalıları arasında bu konuda hâlâ zayıfızdır. Sürüngenler, kuşlar, amfibiler ve köpekbalıkla-

rının görüşü dört renklidir ve görünüşe bakılırsa omurgalıların ortak atasının tetrakromatik olması, ultraviyole ışınlarını da görme becerisine sahip olması muhtemeldir.¹⁰ Hoş bir deney bu olasılığı doğrulamıştır: New York'ta Syracuse Üniversitesi'nde çalışan Yongsheng Shi ve Shozo Yokoyama, yaşayan omurgalıların gen dizilimlerini karşılaştırarak, omurgalı ata genin dizilimini tahmin ettiler. Bu rodopsin atasının, tam olarak hangi dalga boyunu soğurduğunu sadece ilk ilkelerden yola çıkarak tahmin etmemizin henüz bir yolu yok. Hiçbir şeyin yıldırmadığı Shi ve Yokoyama, genetik mühendislik tekniklerini kullanarak bu proteini yaptılar ve sonra da ışığı soğurmasını doğrudan ölçtüler. Ultraviyole ışınlarını soğurduğu (360 nm) anlaşıldı.

Opsin ağacındaki en derin kollar, biraz önce gördüğümüz gibi omurgalılar ile omurgasızlar arasında uzanır. Ama şu yaşayan fosil *Platynereis*'te bile hâlâ iki tip opsin vardır ve bu tipler omurgalılar ile omurgasızların opsinlerine denk düşer. Peki bütün hayvan opsinlerinin büyük atası neye benziyordu, nereden geliyordu? Bu sorunun cevabı kesin olarak bilinmemektedir, ama birkaç varsayım ön sırayı kapmak için yarışmaktadır. Bizim kılavuzumuz genin kendisi olmuştu, onu kullanarak 600 milyon yıl öncesine uzanabilmıştık. Peki daha ne kadar uzağa gidebiliriz? Almanya'da Regensburg Üniversitesi'nde çalışan Peter Hegemann ve meslektaşlarına göre gen aslında bu sorunun cevabını verir, hem de hiç beklenmedik bir cevaptır bu. Hegemann ve meslektaşları gözün ilk atasının alglerde evrildiğini söylerler.

Algler de bitkiler gibi fotosentez ustalarıdır, ışığa duyarlı her tür sofistike pigmentten yararlanabilirler. Bırçok alg bu pigmentleri, ışığın yoğunluğunu kaydetmeye, gerekiyorsa bu konuda bir şey yapmaya yönelik basit göz benzeri alıcılarda kullanır. Örneğin güzelliğiyle ıslıl ıslıl ıslıdayan alg *Volvox* yüzlerce hücreden oluşan, çapı 1 mm'yi bulan içi boş küreler oluşturur. Her hücrede kürek gibi dışarı çıkan iki kamçı vardır, bunlar karanlıkta çırpınır, ama parlak ışıkta durur, fotosentez için en iyi koşulları izleyerek kürenin tamamını güneşe yöneltir. Durma komutu, göz alıcıları tarafından denetlenir. Şaşırtıcı olan şey şudur ki

Volvox'un göz alıcılarında ışığa duyarlı pigment rodopsindir.

Daha da beklenmedik bir nokta, *Volvox*'taki rodopsinin bütün hayvan opsinlerinin atasıymış gibi görünmesidir. Retinalin proteine bağlandığı yerde, hem omurgalı hem omurgasız opsinleriyle aynı olan, aslında pratikte her birinin karışımından oluşan kesimler vardır. Genin genel yapısı da, şifreleyen ve şifrelemeyen (teknik olarak intron ve ekson olarak bilinen) dizilimler karmasıyla hem omurgalı hem omurgasız opsinlerinin antik bir bağlantısını ele verir. Bu bir kanıt değildir, ama kesinlikle her iki familyanın da atası hakkında yürütülebilecek bir tahmindir. Bu da bütün hayvan gözlerinin anasının, fotosentez yapan bir alg olması ihtimalinin yüksek olduğu anlamına gelir.

Elbette ki bu durum, alglerde bulunan bir rodopsinin nasıl olup da hayvanlara geçtiği sorusunu sormamızı gerektiriyor. Hiç kuşkusuz sevimli *Volvox*, hayvanlarla doğrudan aynı soydan değildir. Ama göz alıcısının yapısına göz attığımızda, hemen bir ipucu karşımıza çıkar: Rodopsin, kloroplastların, yani algler ve bitki hücrelerinde fotosentezden sorumlu minicik yapıların zarlarına gömülmüştür. Bundan bir milyar yıl önce, kloroplastların ataları serbest yaşayan fotosentetik bakteriler, daha açık bir deyişle siyanobakterilerdi ve bu siyanobakteriler daha büyük bir hücre tarafından yutulmuşlardı (bkz. üçüncü bölüm). Bu da basit göz alıcılarının mutlaka *Volvox*'a değil, kloroplastlara, hatta belki de onların ataları siyanobakterilere özgü olduğu anlamına gelir.¹¹ Kloroplastlar, bazıları hayvanların doğrudan ataları arasında yer alan birkaç protozoa dahil, başka birçok hücre tipinde de bulunur.

Protozoa tek hücreli organizmalardır, en iyi bilinenleri de amiplerdir. On yedinci yüzyılda mikroskobun öncüsü Hollandalı Anton van Leeuwenhoek, kendi sperminin yanı sıra, onları ilk gören bilim insanı olmuş, unutulmayacak bir isim takarak onlara "mikroskobik hayvan" (animalcule) demiş, onları temelde sebze olduklarından bitkilerle birlikte sınıflandırdığı mikroskobik alglerden ayırmıştı. Ama bu basit ayırmada birçok günah yatıyordu, çünkü bu mikroskobik hayvanların bazılarını büyütüp

kendi boyutlarımıza getirsek, bize Arcimboldo'nun tabloları gibi bakan bu yarı sebze yarı hayvan canavarlardan ödümüz kopardı. Daha makul bir değerlendirme yaparsak, av peşinde yüzüp duran hareketli protozoanın bazılarında, onlara algsel bir boyut kazandıran kloroplastlar bulunur; aslına bakarsanız, bu kloroplastları aynı algler gibi, başka hücreleri yutarak edinmişlerdir. Kimi zaman bu kloroplastlar işlevsel kalır, ev sahiplerinin beslenme gereksinimlerini destekler; ama kimi zaman dejenere olur, kendilerine özgü zarları ve genleri görkemli bir geçmişin sönük bir hatırasıymış gibi geride bırakırlar ya da bir tenekececinin atölyesindeki çeşitli parçacıklarmış, belki de göz gibi yeni bir icadın temeliymiş gibi davranırlar. Bazı araştırmacıların (en başta yine Walter Gehring'in) tahminlerine göre *Volvox*'un kendisinden ziyade, tam da böyle mikroskobik bir kimera bütün hayvan gözlerinin anasını gözden saklayacak türden bir yaratık olabilir.

Hangi minik kimera? Bunu kimse bilmiyor, ama insanın aklını çecek ipuçları ve öğrenecek çok şey var. Bazı protozoa türlerinde (dinoflagellate ya da ateş rengi alglerde) retina, mercek ve korneanın aynı hücrenin içinde bir arada bulunduğu hayret verici derecede karmaşık minicik gözler vardır. Dejenere kloroplastlardan gelişmiş gibi görünen bu gözlerde de kloroplast kullanılır. Hayvan gözlerinin, bu kalabalık ve pek az bilinen mikrokozmosta bunlardan doğrudan mı yoksa dolaylı olarak mı geliştiği henüz cevaplanmamış bir sorudur. Bunun öngörülebilir bir adım olarak mı gerçekleştiğini yoksa talihin garip bir cilvesiyle mi ortaya çıktığını söyleyemiyoruz. Ama hem özel hem evrensel olan bu tür bir soru tam da bilimin malzemesidir, umarım gözleri yıldızlarda yükselen bir kuşağa esin yerir.

VIII

Sıcakkanlılık

Enerji Engelinin Aşılması



Bir çocuk şarkısında, bir treni sürüyorsan zaman akar der. Tam tersini çocukluk yıllarından kim hatırlamaz ki? Bir arabanın arka koltuğunda, insanın aklının bulandığı sonu gelmez dakikaların sıkıntısı içinde yönelttiğiniz “Babacığım daha gelmedik mi?” sorularını? Sanırım çoğu okur, yaşlanan büyükbabalarının ya da ebeveynlerinin salyangoz gibi yavaşladıklarına, sonunda saatler dakikalar gibi akarken anlaşılmaz bir şekilde oturduklarına tanık olmanın sıkıntısını da hatırlayacaktır. İki aşırı uç da bizim dünyamızın temposundan, yetişkin insanın andantesinden çok uzaktır.

Zamanın göreliliğini Einstein’dan duymaya ihtiyacımız yok. Ama Einstein’ın zaman ve uzay açısından kuvvetle ortaya koyduğu şey, biyolojide her zaman olduğu gibi daha izlenimcidir. Nükteleriyle meşhur Clement Freud’un dediği gibi: “Sigaray, içmeyi ve sevmeyi bırakmaya karar verdiyseniz, aslında daha uzun yaşamazsınız, sadece daha uzun yaşamışsınız gibi gelir.”¹ Yine de zamanın çocuklukta hızla geçtiği, ileri yaşlarda yavaş yavaş ilerlediği yönünde gerçek bir his vardır: Bu his bizim iç ayarlarımızda, metabolik hızımızda, kalbimizin çarpma, hücrelerimizin gıdaları oksijenle yakma hızında yatar. Yetişkinler arasında bile tezcanlılar ile ağırkanlılar arasında çarpıcı bir farklılık

göze çarpar. Çoğumuz ağır ağır bu hallerin birinden diğerine geçeriz. Yavaşlama, hatta kilo alma hızımız, bireyler arasında doğuştan gelen farklılıklar gösteren metabolik hızımıza bağlıdır. Aynı miktarda yiyen, aynı miktarda egzersiz yapan iki kişi dinlendikleri sırada kalori yakma eğilimleri bakımından genellikle farklılık gösterirler.

Metabolik hız hiçbir yerde, sıcakkanlı yaratıklarla soğukkanlı yaratıklar arasındaki farklılıkta olduğu kadar önemli değildir. Sıcakkanlı, soğukkanlı terimleri biyologların gözünü korkutsa da hemen hemen herkes için canlı ve anlamlı sözcüklerdir, homeotermi ve poikilotermi gibi kaygan teknik terimler kadar fazla şey ifade ederler. İlginçtir, ama biyolojinin birkaç yönü vardır ki biz sıcakkanlılar bu konularda epey şovenist tavırlar sergiliyoruz. Örneğin, dinazorların sıcakkanlı mı yoksa soğukkanlı mı olduğu konusunda dergilerde ve internette ortaya dökülen hiddeti, hıncı akılcı terimlerle anlamak güç: Derinlerde hissedilen bir ayrımdır bu, hatta belki de onurumuzla ilgilidir: Bizi devasa kertenkelelerin gövdeye indirmiş olması mı iyidir, yoksa akıllı, plan yapabilen, hayatta kalabilmek için kendilerine karşı aklımızı kullanmak zorunda olduğumuz hızlı hareket eden hayvanların mı? Öyle görünüyor ki biz memeliler küçük, tüylü hayvanlar olarak geçmişin başlıca yırtıcıları karşısında korkuyla yeraltına sinerek geçirdiğimiz zamanların hıncını hâlâ içimizde duyuyoruz. Ama bütün bunların üstünden 120 milyon yıl geçti, neresinden bakarsanız bakın epeyce uzun bir süre.

Sıcakkanlılık metabolik hızla, hayatın hızıyla ilgilidir. Sıcakkanlılık ısının artmasıyla birlikte hayatın temelindeki biyokimyasal tepkimeler de dahil bütün kimyasal tepkimelerin hızlanmasına katkıda bulunur. Biyolojik bakımdan anlamlı ısılarda yer aldığı küçük yelpazede (hayvanlarda 0°C'den 40°C'ye kadar) performansta çarpıcı bir farklılık gözlenir. Örneğin, bu yelpazede ısıda her 10°C'lik artış, oksijen tüketiminin iki katına çıkmasına yol açar, bu da canlılık ve kuvvetin artması demektir. Dolaısıyla vücut ısısı 37°C olan bir hayvan, 27°C olan bir hayvanın iki katı, 17°C olan bir hayvanın dört katı kuvvete sahiptir.

Ama, ısı asıl meseleyi büyük ölçüde gözden kaçırmamıza neden olur. Sıcakkanlı hayvanlar, soğukkanlı hayvanlardan daha sıcak değildir, çünkü çoğu sürüngen güneşin enerjisini soğurmakta, vücut ısılarını memeliler ve kuşlarınkine yakın seviyelere çıkarmakta ustadır. Bu yüksek ısıları karanlık bastıktan sonra koruyamazlar, orası kesin; ama memeliler ve kuşlar da geceleri genellikle faal değildir. Onlar da vücut ısılarını düşürerek enerji tasarrufu yapabilirler, ama bunu nadiren yaparlar, en azından fazla yapmazlar. (Gerçi sinekkuşları enerjilerini korumak için genellikle komaya girer.) Enerji bilincine erdigimiz şu çağlarda, memeliler çevrecileri ağılatıyor olsa gerek: Termostatımız, ihtiyaç ne olursa olsun, haftanın yedi günü, günün 24 saati 37°C'ye kilitlenmiştir. Hele alternatif enerjiyi unutun gitsin. Kertenkeleler gibi güneş enerjisinden yararlanmamız hiçbir şekilde mümkün değildir, ama olağanüstü bir biçimde, içimizdeki karbon yakan santraller sayesinde ısı üretiriz, bu da bizim devasa bir karbon ayak izi bırakmamıza yol açar. Asıl eko-holiganlar memelilerdir.

Geceleyin tam güç çalışmanın memelilere sabahleyin enerjik bir çıkış yapma imkanı verdiğini düşünebilirsiniz, ama kertenkeleler de vücut ısılarını operasyonel düzeylere yükseltmeye çok zaman harcamazlar. Örneğin, kulaksız kertenkelenin başının üzerinde bir kan sinüsü bulunur, bu boşluk sayesinde bütün bedenini hızla ısıtabilir. Sabahleyin başını ininden çıkarır, bir gözüyle avcılar kollar, gerekirse hemen içeri kaçmaya hazırdır, genellikle yarım saat sonra dışarı çıkıp dolaşacak kadar ısınmış olur. Güne hoş bir başlangıç, öyle değil mi? Doğal seçilimin başlıca niteliklerinden biri de tek bir işlevle memnun olmamasıdır. Bazı kertenkelelerde bu sinüsten gözkapaklarına inen bir bağlantı vardır, dışarıda yakalanırlarsa bu bağlantı sayesinde bazı avcılara, örneğin köpeklerle kan püskürtebilirler, avcılar bu kanın tadını iğrenç bulur.

Yüksek ısyı korumanın bir başka yolu da boyuttur. İki hayvanın yere halı olarak serilmiş postlarını gözünüzün önüne getirmeniz için büyük, beyaz bir avcı olmanıza gerek yok. Böyle bir postun diğerinden iki kat uzun ve geniş olduğunu düşünelim. Bu

demektir ki büyük hayvanın postu küçük hayvaninkinden dört kat daha büyüktür ($2 \times 2 = 4$), ama sekiz kat daha ağır olacaktır, çünkü derinliği de iki kat daha fazladır ($2 \times 2 \times 2 = 8$). Dolayısıyla her boyutun iki katına çıkması yüzey/ağırlık oranını yarıya indirir ($4/8 = 0,5$). Ağırlığı oluşturan her kilonun aynı miktarda ısı ürettiğini dikkate aldığımızda, daha büyük hayvanların daha kilolu olduğunu, bu yüzden de daha fazla iç ısı ürettiklerini görürüz.² Aynı zamanda, ısıyı da daha yavaş kaybederler, çünkü derilerinin yüzeyi nispeten (üretilen iç ısıya nispeten) küçüktür. Dolayısıyla, bir hayvan ne kadar büyükse, o kadar ısınır. Bir noktada soğukkanlı yaratıklar sıcakkanlı hale gelir. Örneğin, büyük timsahlar teknik olarak soğukkanlıdır, ama ısıyı sıcakkanlılık sınırına yaklaşacak kadar uzun süre korurlar. Geceleyin bile, çok az iç ısı üretilmesine rağmen, vücut ısıları sadece birkaç derece düşer.

Açıktır ki birçok dinazor, bu boyut eşiğini rahatlıkla aşabilirdi, özellikle de o sakin günlerde gezegenin büyük bölümünde havanın ılık olduğu dikkate alınır, filen sıcakkanlı olduklarını söyleyebiliriz. O günlerde buz dağları yoktu örneğin, atmosferdeki karbondioksit seviyesi de bugün olduğundan on kat fazlaydı. Başka bir deyişle, bazı basit fiziksel ilkeler, birçok dinazorun, metabolik durumları ne olursa olsun sıcakkanlı olabilecekleri anlamına gelir. Devasa otoburlar pekala ısı kazanmaktan çok ısı kaybetmekte sıkıntı çekmiş olabilirler; bazı anatomik tuhaflıklar, örneğin *stegosaurus*'un devasa zırhlı levhaları, tıpkı fillerin kulakları gibi ısının yayılmasında ikincil bir rol üstlenmiş olabilir.

Ama işler bu kadar basit olsaydı, dinazorların sıcakkanlı olup olmadıklarını tartışmaya hacet olmazdı. Bahsettiğimiz sınırlı anlamda kesinlikle öyleydiler, en azından birçoğu sıcakkanlıydı. İnsanın ağzını dolduran terimleri sevenler buna "eylemsiz endotermi" der. Dinazorlar yüksek bir iç ısıyı korumakla kalmıyor, bugünkü memeliler gibi karbon yakarak içlerinde de ısı üretiyorlardı. Peki hangi geniş anlamda dinazorlar sıcakkanlı değillerdi? Birazdan göreceğimiz gibi, bazıları pekala sıcakkanlı olabilirdi, ama memeliler ya da kuşlarda sıcakkanlılığın asıl tu-

haflığını anlayabilmemiz için küçük hayvanlarda, “sıcakkanlılık eşiği”nin altında neler olduğunu görelim diye boyut eğilimini tersine çevirmemiz gerekiyor.

Bir kertenkele düşünün. Tanım itibarıyla soğukkanlıdır, yani iç vücut ısını geceleyin koruyamaz. Büyük bir timsah vücut ısını korumaya yaklaşabilirse de, hayvan ne kadar küçük olursa, beden ısını koruması da o kadar zor olur. Kürk ya da tüyler gibi bir yalıtım sadece bir noktaya kadar yararlı olur ve aslına bakarsanız, çevreden ısı emilimine müdahalede bulunabilir. Bir kertenkeleyi bir kürke sarın (söylemeye gerek bile yok, çalışkan araştırmacılar tam da bunu yapmıştır), kertenkelenin hızla soğudüğünü, güneşin ısını iyi ememediğini ya da bunu telafi edecek kadar iç ısı üretmediğini görürsünüz. Memelilerde ya da kuşlarda olan durumdan çok uzaktır, bu da bizi sıcakkanlılığın asıl tanımına getirir.

Memeliler ve kuşlar hemen hemen aynı boyutlardaki bir kertenkeleden on ya da on beş kat daha fazla iç enerji üretir. Bir kertenkeleye bir memeliyi boğucu derecede sıcak bir ortama bırakırsanız, memelinin kendi zararına kertenkeleden on kat fazla iç ısı üretmeyi sürdürdüğünü görürsünüz. Memeli serinlemenin bir yolunu bulmak zorundadır: Su içer, bir havuza dalar, gölgelik bir yer bulur, kendisini yelpazeler, kokteyl içer ya da havalandırmayı açar. Kertenkeleyse keyfine bakar. Kertenkelelerin, genel olarak sürüngenlerin çöl koşullarına daha iyi dayanmasında şaşılabilecek bir şey yoktur.

Şimdi bir kertenkeleye bir memeliyi soğuk bir ortama, diyelim ki dondurucu olmaya yakın bir ortama bırakalım: Kertenkele kendisini yapraklarla örter, kıvrılır ve uykuya dalar. Doğrusunu söylemek gerekirse, birçok küçük memeli de böyle yapar, ama bu bizim fabrika ayarımız değildir. Tam tersine. Bu gibi koşullarda biz daha fazla besin yakarız. Bir memeli için soğukta yaşamının bedeli, bir kertenkele için olduğundan yüz kat ağırdır. Ilımlı koşullarda, diyelim ki 20°C civarında, Avrupa'nın büyük bölümünde hoş bir bahar gününde bile aralarındaki fark devasadır, yaklaşık 30 kattır. Böyle olağanüstü bir metabolik hızı

korumak için, memelinin bir sürüngenden 30 kat daha fazla besin yakması gerekir. Memeli, bir kertenkelenin bir ayda yediğini, bir günde ve her gün yemek zorundadır. Bedava yemek diye bir şey olmadığı düşünülürse, bu bayağı ciddi bir bedeldir.

İşte karşınızda: Bir memeli ya da kuş olmanın bedeli, bir kertenkele olmanın bedelinin yaklaşık olarak en az on katından başlar, genellikle bundan daha yüksektir. Bu pahalı hayat tarzımıza karşılık ne elde ederiz? Bunun bariz cevabı, yaşam ortamının genişlemesidir. Sıcakkanlılığın çölde bir getirisi yoksa da, geceleyin yiyecek aramayı ya da ılımlı iklimlerde kış boyunca faal bir varlık göstermeyi mümkün kılar; bunların ikisi de kertenkelelerden esirgenmiştir. Bir başka avantaj da beyin gücüdür, gerçi sıcakkanlılık ile beyin gücü arasında neden bir ilişki olması gerektiğini görebilmek güçtür. Hiç kuşku yok ki memelilerin beyinleri beden boyutlarına nazaran kertenkelelerde olduğundan daha büyüktür. Beynin daha büyük olması zekanın, hatta reflekslerin hızlı olmasının garantisi olmasa da, öyle görünüyor ki daha hızlı bir metabolizma, özel kaynak aktarımında bulunmaksızın daha büyük bir beyni desteklemektedir. Dolayısıyla hem kertenkeleler hem memeliler kaynaklarının diyelim ki %3'ünü beyne ayırıyorlarsa, bununla birlikte memeliler 10 kat daha fazla kaynağa sahiplerse, kertenkelelerden 10 kat daha büyük beyinlere sahip olabilirler; genellikle de durum tam olarak böyledir. Bunu söylemişken, primatların, özellikle de insanların kaynaklarının çok daha büyük bir bölümünü beyin gücüne ayırdıklarını belirtelim. Örneğin, insanlar kaynaklarının %20'sini, bedenlerinin sadece yüzde birkaçını oluştursa da beyne ayırırlar. O halde kuşkularım var: Beyin gücü, sıcakkanlı bir hayat tarzı için, hiçbir bedel ödenmeksizin sahip olunan bir ekstradan öteye gitmiyor olabilir. Daha büyük beyinlere sahip olmanın daha ucuz yolları da bulunuyor.

Kısacası, yaşam ortamının genişlemesi, gece faaliyet gösterebilme ve fazladan beyin gücü, sıcakkanlılığın ciddi metabolik maliyetinin getirisiymiş gibi görünmüyor pek. Öyle görünüyor ki eksik bir parça var. Borçlar hanesinde, yemenin, yemenin, ye-

menin maliyetleri karın ağrısının epey ötesine geçiyormuş gibi görünüyor. Yiyecek bulma, avlanma ya da bitki toplamak için harcanan ciddi bir emek ve zaman maliyeti söz konusu, avcılar ya da rakiplerin hassas olduğu bir devir. Besinler tükenir ve seyreler. Açıktır ki ne kadar hızlı yerseniz, besininiz de o kadar hızlı tükenir. Nüfusunuz azalır. Kural itibarıyla metabolik hız nüfus boyutlarına hükmeder; sürünge nlerin sayısı da genellikle memelilerden on kat fazladır. Aynı gerekçeyle, memelilerin daha az yavrusu olur. (Gerçi sahip oldukları az sayıda yavruya daha fazla kaynak ayırabilirler.) Ömür süreleri bile metabolik hıza göre farklılık gösterir. Clement Freud insanlar hakkında haklıydı, ama sürünge nler konusunda yanılıyordu. Sürünge nler yavaş ve sıkıcı hayatlar yaşıyor olabilirler, ama uzun yaşarlar, örneğin dev kaplumbağalar yüzlerce yıl yaşar.

Demek oluyor ki sıcakkanlılık acımasız bir fatura keser. Tehlikeli bir biçimde yemeye harcanan kısa bir hayat dayatır. Nüfusun boyutları ve yavruların sayısı bakımından sıkıntılar yaratır, bunlar doğal seçilimle acımasızca cezalandırılması gereken iki etkindir. Buna karşılık ödülümüz geceleri ayakta kalabilmek ve soğuğa dayanabilmektir. Kötü bir anlaşma gibi görünüyor, özellikle de her halükarda uyumaya gittiğimizden. Ama hayatın büyük panteonunda zirveyi hep memeliler ve kuşlara ayırıyoruz. Bizde olup da sürünge nlerde olmayan şey tam olarak nedir? Anlaşılsa iyi olur.



En ikna edici tek cevap “dayanma gücü”dür. Kertenkeleler hız ve kas gücü bakımından kolayca memelilere denk olabilir, hatta kısa mesafelerde hız bakımından onları geride bırakırlar, ama çok çabuk yorulurlar. Bir kertenkeleye uzanın, göz açıp kapayıncaya kadar gözden kaybolacaktır, daha siz göremeden en yakın kuytuya süzölüverecektir. Ama sonra, genellikle saatlerce dinlenir, sarf ettiği onca çabanın ardından acı verecek kadar yavaş bir biçimde kendisine gelir. Sorun şudur ki sürünge nler rahat etmek için değil, hız için yaratılmışlardır.³ Hız koşucusu insanlar

gibi onlar da anaerobik solumaya dayanır, bu demek oluyor ki soluma zahmetine katlanmazlar, ama bu durumu da uzun süre koruyamazlar. Son derece hızlı bir biçimde (ATP olarak) enerji üretirler, ama bunu yaparken kullandıkları süreçler kısa süre sonra onları laktik asitle doldurur, kramplarla sakatlar.

Aradaki fark kasların yapısına yazılmıştır. Altıncı bölümde gördüğümüz üzere, çeşitli kas tipleri vardır. Bu kas tipleri üç kilit bileşenin dengesi bakımından farklılık gösterir: kas lifleri, kılcal damarlar ve mitokondriler. Esas itibarıyla kas lifleri kasılarak kuvvet üretir, kılcal damarlar oksijen tedarik eder ve atıkları taşır, mitokondrilerse gıdayı oksijenle yakarak kasılma için gerekli enerjiyi sağlar. Sorun şudur ki bunların hepsi de değerli yerleri işgal eder, bu yüzden ne kadar fazla kas lifiniz olursa kılcal damarlara ya da mitokondrilere o kadar az yer kalır. Liflerle sıkı sıkıya dolu bir kasın muazzam bir kuvveti olacaktır, ama kasılmak için gerekli enerjiden kısa sürede yoksun kalacaktır. Çok nüfuz edici sonuçları olan bir tercihtir bu: Gücünüzün yüksek dayanıklılığınızın düşük olmasıyla gücünüzün az dayanıklılığınızın yüksek olması arasında bir seçim yapmanız gerekir. İri yapılı bir kısa mesafe koşucusuyla ince yapılı bir uzun mesafe koşucusunu karşılaştırdığınızda aradaki farkı görebilirsiniz.

Hepimizde bir kas tipleri karışımı bulunur ve koşullara bağlı olarak bu karışım farklılık gösterir: Örneğin deniz seviyesinde ya da yükseklerde yaşamamıza bağlı olarak değişir. Hayat tarzı da büyük bir farklılık yaratabilir. Kısa mesafeli hız koşucusu olma eğitimi alırsanız, “hızlı segiren” iri iri kaslar geliştirirsiniz, çok güçlüdürler, ama dayanıklılıkları azdır. Uzun mesafe koşucusu olma eğitimi alırsanız, kaslarınız öbür türlü gelişir. Çünkü bu farklılıklar, bireyler ve ırklar arasında da doğuştan gelen farklılıklar gösterir, koşullar buyurursa kuşaklar boyunca seçilime tabi olurlar. Nepalliler, Doğu Afrikalılar ve And kıızılderililerinin yüksekte sürülen hayatlara özgü birçok ortak özelliği olmasının, aşağıda yaşayanlarınsa daha ağır ve iri yarı olmasının sebebi budur.

Albert Bennett ile John Ruben’in 1979’da, Irvine California Üniversitesi’nde çalıştıkları dönemde kaleme aldıkları klasik bir

makaleye göre, sıcakkanlılığın kökeninde bu gibi farklılıklar yatar. Yazarlar, ısıyı aklınızdan çıkarın derler: Sıcakkanlı yaratıklar ile soğukkanlı yaratıklar arasındaki farklılık sadece dayanıklılık ile ilgilidir. Onların bu fikri “aerobik kapasite” fikri olarak bilinir ve tümüyle doğru olmasa bile bütün bir biyoloji alanının hayat hakkında düşünme biçimini değiştirmiştir.

Aerobik kapasite varsayımı iki iddiada bulunur. Öncelikle seçim ısı değil, faaliyetin artmasıyla ilgilidir, bu da birçok koşulda doğrudan yararlıdır. Bennett ve Ruben meseleyi şu şekilde ortaya koymuştur:

Faaliyet artışının seçici yararları incelikli değildir, daha ziyade hayatta kalma ve üreme açısından merkezi önem taşır. Dayanıklılığı daha fazla olan bir hayvanın seçim bakımından kolayca anlaşılabilir bir avantajı olur. Besin toplar ya da besin haline gelmekten kaçınırken, daha yüksek bir takip ya da uçuş düzeyini koruyabilir. Topraksal savunma ya da işgalde daha üstün olacaktır. Kurlaşma ve eşleşmede daha başarılı olacaktır.

Buraya kadar tartışılmaz görünüyor. Polonyalı zoolog Pawel Koteja bu fikri geliştirirken, ilginç bir vurguyla, memeliler ile kuşları soğukkanlı hayvanlardan ayıran bir özellik üzerinde durmuş, ebeveyn bakımına, yavruların aylarca ya da yıllarca beslenmesine dikkat çekmiştir. Böyle bir yatırım ciddi bir dayanıklılık gerektirir, hayvanın hayatının en hassas döneminde hayatta kalma üzerinde büyük bir etkisi olabilir. Ama kesin sebepleri ne olursa olsun, aerobik kapasite varsayımının daha sorunlu ve ilginç olan kısmı ikinci kısımdır: Dayanıklılık ile dinlenme arasındaki ilişkidir. Bennett ile Ruben, metabolizmanın çıkabileceği en yüksek hız ile dinlenme sırasındaki hızı arasında mutlak bir bağlantı olduğunu söylerler.

Metabolizmanın çıkabileceği en yüksek hız, tam gazda, artık daha fazla hız yapamayacak olduğumuz durumda tüketilen oksijen miktarı olarak tanımlanır. Zindeliğe ve elbette ki genler de dahil olmak üzere birçok şeye bağlıdır. Metabolizmanın

çıkabileceği en yüksek hız nihayetinde son kullanıcıların, yani kaslardaki mitokondrilerin oksijen tüketim hızına bağlıdır. Mitokondriler oksijeni ne kadar hızlı tüketirlerse, metabolizmanın ulaşabileceği en yüksek hız o kadar hızlı olur. Ama üstünkörü bir değerlendirme bile, hepsi de birbiriyle ilişkili birçok etkenin bu süreçte etkili olması gerektiğini açıkça gösterir. Mitokondrilerin sayısı, onları besleyen kılcal damarların sayısı, kan basıncı, kalbin büyüklüğü ve yapısı, kırmızı kan hücrelerinin sayısı, oksijen taşıyan pigmentin, yani hemoglobinin kesin moleküler yapısı, akciğerlerin büyüklükleri ve yapıları, nefes borusunun çapı, diyaframın kuvveti vs. hepsi de etkili olacaktır. Bunlardan herhangi birinde bir kusur varsa, metabolizmanın çıkabileceği en yüksek hız daha düşük olacaktır.

O halde seçilimin dayanıklılıktan yana olması demek, seçilimin en yüksek metabolik hızın daha yüksek olmasından yana olması demektir, o da bir dizi nefes alma özelliğinin seçilimi anlamına gelir.⁴ Bennett ile Ruben'e göre, en yüksek metabolik hızın yüksek olması bir şekilde dinlenme sırasındaki metabolik hızı da "yukarı çeker". Başka bir deyişle, çok dayanıklı, atletik bir memelinin dinlenme sırasındaki metabolik hızı en baştan yüksek olacaktır: Hiçbir şey yapmadan yatıp uzanıyor olsa bile bir sürü oksijen solur. Bennett ile Ruben bu tezi ampirik olarak savunmuşlardır. Hangi sebeple olursa olsun, memeli olsun, kuş ya da sürüngen olsun bütün hayvanların en yüksek metabolik hızlarının, dinlenme sırasındaki metabolik hızlarından on kat daha fazla olma eğilimi gösterdiğini belirtmişlerdir. Dolayısıyla, seçilimin en yüksek metabolik hızın yükselmesinden yana olması, dinlenme sırasındaki metabolik hızı da yükseltir. Metabolik hızın çıkabileceği en yüksek seviye on kat artarsa (memeliler ile kertenkeleler arasındaki kayıtlı farklılıktır bu), dinlenme sırasındaki metabolik hız da on kat artar. O aşamaya gelindiğinde, hayvan kendi içinde o kadar fazla ısı ürettiyordur ki aslında kaza-ra "sıcakkanlı" olmuştur.

Bu fikir hoştur, sezgisel olarak da anlamlıdır, ama yakından incelendiğinde, bu ikisinin neden ilişkili olması gerektiğini anla-

mak çok zordur. Metabolik hızın çıkabileceği en yüksek seviye, oksijenin kaslara ulaştırılmasıyla ilgilidir, ama dinlenme sırasında kaslar oksijen tüketimine çok az katkıda bulunur. Dinlenme sırasında en önemli rolü iç organlar (karaciğer, pankreas, böbrekler, bağırsaklar vs.) oynar. Karaciğerin neden kaslar çok oksijen tükettiği için çok fazla oksijen tüketmesi gerektiği açık değildir. En azından aerobik kapasitesi çok yüksek olup dinlenme sırasındaki metabolik hızı çok düşük olan bir hayvan tahayyül etmek mümkündür: Her iki dünyanın en iyi yönlerini birleştiren, güçlenmiş bir tür kertenkele. Belki de dinozorlar tam olarak böyleydi. Doğrusunu söylemek gerekirse, bugünkü hayvanlarda metabolik hızın çıkabileceği en yüksek seviye ile dinlenme sırasındaki metabolik hızın ilişkili olma eğilimi göstermesinin nedenini ya da bazı hayvanlarda bu bağlantının bozulup bozulmadığını henüz bilmiyor olmamız biraz utanç vericidir.⁵ Hiç kuşku yok ki Amerikan antilopu gibi çok atletik memelilerin aerobik kapasiteleri çok yüksektir, dinlenme sırasındaki metabolik hızlarından 65 kat daha fazladır, bu da ikisinin bağlantısız olabileceği anlamına gelir. Aynı şey sürüngenler için de geçerlidir. Örneğin, Amerikan timsahının aerobik kapasitesi dinlenme sırasındaki metabolik hızından 40 kat daha yüksektir.

Her ne olursa olsun, Bennett ile Ruben'in haklı olduğunu düşünmemizi gerektirecek haklı sebepler vardır. Herhalde bu sebeplerin en güçlüsü de çoğu sıcakkanlı hayvanda ısının kaynağıyla ilgilidir. Doğrudan ısı üretmenin birçok yolu vardır, ama çoğu sıcakkanlı hayvan bu zahmete girmez: Isı üretimleri metabolizmalarının dolaylı bir sonucudur. Sadece fareler gibi hızla ısı kaybeden küçük memeliler doğrudan ısı üretir. Fareler (ve birçok memeli türünün yavruları) kahverengi yağ olarak bilinen, sıcak mitokondrilerle dolu özelleşmiş bir dokudan yararlanırlar. Başvurdukları numara hayli basittir. Normalde mitokondriler zarları üzerinde protonlardan oluşan bir elektirik akımı üretirler, bu elektirik akımı hücrenin enerji birimi olan ATP üretiminde kullanılır (bkz. birinci bölüm). Bu mekanizmanın tamamı, bir yalıtıcı olarak hareket eden bozulmamış bir zar gerektirir. Zarda-

ki herhangi bir sızıntı, proton akımında kısa devre yaratır, akımın enerjisini ısı olarak yayar. Kahverengi yağda da olan budur işte, protein ağızları zarın üstüne kasten yerleştirilmiş, onu sızdırıcı hale getirmişlerdir. Bu mitokondriler, ATP yerine ısı üretir.

O halde başlıca amaç ısıysa, çözüm sızdırıcı mitokondrilerdir. Bütün mitokondriler, kahverengi yağda olduğu gibi son derece sızdırıcı hale getirilirse, besinin bütün enerjisi doğrudan ısıya dönüştürülür. Basit ve hızlı bir işlemdir bu, çok yer kaplamaz, çünkü küçük bir miktar doku verimli bir biçimde ısı üretir. Ama normalde olan bu değildir. Mitokondrilerin sızdırma derecesi bakımından kertenkeleler, memeliler ve kuşlar arasında pek az farklılık görülür. Soğukkanlı yaratıklar ile sıcakkanlı yaratıklar arasındaki farklılık çoğunlukla organların boyutlarında ve mitokondrilerin sayısında yatar. Örneğin, bir farenin karaciğeri hemen hemen aynı boyutlardaki bir kertenkelenin karaciğerinden çok daha büyüktür ve çok daha fazla sayıda mitokondriyle doludur. Başka bir deyişle, sıcakkanlı yaratıkların iç organları etkili bir biçimde turbo yakıtlıdır. Bol miktarda oksijeni doğrudan ısı üretmek için değil, performansı artırmak için tüketirler. Isı sadece bir yan üründür, kürk ve tüyler gibi dış yalıtımın gelişmesiyle birlikte sonradan yakalanır ve kullanıma sunulur.

Bugünkü hayvanların gelişiminde sıcakkanlılığın başlangıcı, sıcakkanlılığın ısı üretiminden çok turbo yakıtlı iç organlarla ilgili olduğu fikrini destekliyor. Sydney Üniversitesi'nde çalışan evrimsel fizyolog Frank Seebacher, embriyonik kuşlarda sıcakkanlılığın başlangıcının ardında hangi genler bulunduğunu araştırmaya başlamış, tek bir "efendi gen" in (PGC1 α denilen bir proteini şifreleyen genin) iç organların mitokondrilerini yayılmaya zorlayarak onlara güç sağladığını bulmuştu. Hücrelerin kopyalanması ile ölümleri arasındaki dengenin benzer "efendi genler" sayesinde ayarlanmasıyla, organ büyüklüğü de hayli kolaylıkla kontrol edilebilir. En önemlisi de organların turbo şarj edilmesi genetik olarak yapılması zor bir şey değildir, bir avuç gen tarafından kontrol edilebilir, ama enerjik bakımdan son derece masraflıdır ve ancak getirisi muazzamsa seçilir.

Bu durumda aerobik kapasite varsayımının çizdiği geniş kapsamlı senaryo inandırıcı görünmeye başlar. Sıcakkanlı hayvanların soğukkanlı hayvanlardan daha dayanıklı olduğuna kuşku yoktur, genellikle aerobik kapasiteleri soğukkanlılardan 10 kat daha fazladır. Hem memelilerde hem kuşlarda, bu yüksekte uçan aerobik kapasiteye turbo enerji yüklü bir dinlenme metabolizması, yani mitokondrisel enerjileri yüksek büyük iç organlar eşlik eder, ama ısı üretimi konusunda kasti girişimler azdır. Yüksek bir aerobik kapasitenin güçlü bir destek sistemiyle birlikte işlemesi gerektiği, en azından bana, bir şekilde sezgisel olarak anlamlı görünüyor. Bu fikir kolayca test edilebilir bir fikirdir. Hayvanı yüksek aerobik kapasiteyi seçmek için çoğaltırsanız, dinlenme sırasındaki metabolik hızın da buna uyması gerekir. Nedensel ilişkileri kanıtlamak zor olsa da, en azından ikisi arasında bir korelasyon bulunmalıdır.

Asıl mesele de buradadır işte. Yaklaşık 30 yıl önce ileri sürüldüğü tarihten beri, bu varsayımı deneysel olarak kanıtlama yönünde birçok girişimde bulunulmuş, bazen başarılı, bazen başarısız olunmuştur. Dinlenme sırasındaki metabolik hızla metabolik hızın çıkabileceği en yüksek seviyenin bağlantılı olması yönünde bir eğilim mevcuttur gerçekten, ama durum bundan biraz daha öteye geçer, kuralın birçok istisnası vardır. Böyle bir bağlantı fizyolojik bakımdan zorunlu olmasa bile, belki de evrimleri sırasında ikisi bağlantılıydı, böyle de olabilir pekala. Evrim tarihine dair daha özgül bir fikrimiz olmadıkça kesin bir şey söylemek zor. Ama belki de bu kez fosil kayıtları bu bilmecenin anahtarını sunabilir. Bu bağlantı fizyolojide değil, tarihin cilvelerinde yatıyor olabilir.



Sıcakkanlılık, karaciğer misali iç organların gücüyle ilgilidir. Ama yumuşak dokular zamanın yıkıcılığına pek dayanamaz, hatta kürkler bile kayalarda nadiren korunur. Uzunca bir süre boyunca, sıcakkanlılığın kökenlerini fosil kayıtlarından kazıyıp çıkarmak zor olmuştur, bugün bile öfkeli tartışmalar pek yaban-

cı sayılmaz. Ama fosil kayıtlarını aerobik kapasite ışığında değerlendirmek daha uygun bir iş olur, çünkü iskelet yapısından çok şey öğrenilebilir.

Hem memelilerin hem kuşların atalarının izi, 250 milyon yıl önce başlayan Trias Çağı'na kadar sürülebilir. Bu dönem, gezegenimizin tarihindeki en büyük kitlesel tükenişin, bütün türlerin yüzde 95'ini silip götürdüğü sanılan Permien tükenişinin ardından gelmiştir. Bu kıyımdan sağ kurtulan pek az tür arasında iki sürüngen grubu, bugünkü memelilerin ataları *therapsid*'ler (memeli benzeri sürüngenler) ile kuşlar ve timsahların, ayrıca dinazorlar ve *pterozor*'ların ataları olan *archosaur*'lar (Yunanca "hakim kertenkeleler") bulunuyordu.

Daha sonraki dönemlerde dinazorların yükseldiği ve gezegene hakim olduğu düşünülürse, *therapsid*'lerin Trias Çağı'nın başlangıcında en başarılı grup olduğunu öğrenmek herhalde şaşırtıcıdır. Onların torunları olan memelilerin boyutları küçülmüştür ve bunlar dinazorların saldırısı öncesinde kovuklara, deliklere, inlere inmiştir. Ama Trias Çağı'nın başlangıcında, en baskın tür, iki güdük fildişi, basık bir yüzü ve geniş bir göğsü olan domuz büyüklüğünde bir otobur olan *Lystrosaurus*'tu ("kürek kertenkelesi"). *Lystrosaurus*'un tam olarak nasıl bir hayat sürdüğü muğlaktır. Uzun yıllar boyunca, amfibi hayvanlar, küçük bir sürüngen suaygırı olarak resmedilmişlerdir, ama artık daha çorak iklimlerde yaşadıkları, hendekler kazdıkları düşünülmektedir. Hendek kazmak *therapsid*'lerin ortak özelliğidir. Bunun önemine daha sonra döneceğiz; ama açık olan şey şudur ki *Lystrosaurus*'lar Trias Çağı'nın başlangıcında hiç görülmedik bir hakimiyet sağlamışlardır.⁶ Bir dönem boyunca yerdeki bütün omurgalıların yüzde 95'inin *Lystrosaurus* olduğu söylenir. Amerikalı şair ve doğabilimci Christopher Cokinos'un dediği gibi, "Düşünün ki yarın sabah kalkıp kıtaları aşan bir yürüyüşe çıkıyorsunuz ve her yerin, diyelim ki sadece sincaplarla dolu olduğunu görüyorsunuz."

Lystrosaurus'lar otoburdu, herhalde o çağda yaşamış tek otobur onlardı ve o dönemin hiçbir avcısından yana da korkuları yoktu. Trias Çağı'nın sonraki dönemlerinde *cynodont* denilen,

lystrosaur'larla ilişkili bir grup *therapsid*, *lystrosaur*'ların yerini almaya başladı, sonunda 200 milyon yıl önce Trias Çağı'nın sonlarına doğru *Lystrosaur*'ların türü tükendi. *Cynodont*'lar arasında hem otoburlar hem etoburlar bulunuyordu, Trias Çağı'nın sonuna doğru ortaya çıkan memelilerin doğrudan habercileriydiler. *Cynodont*'lar yüksek bir aerobik kapasitenin birçok işaretini gösteriyorlardı: hava yollarıyla ağız ayıran, aynı anda hem solumayı hem çiğnemeyi mümkün kılan kemikli bir damak, değişmiş bir kaburga kafesinin bulunduğu geniş bir göğüs ve muhtemelen kassı bir diyafram. Sadece bunlar da değil, burun kanalları da genişlemişti; "solunum yolları" olarak bilinen narin, kafes işi bir kemiği sarıyorlardı. *Cynodont*'lar belki tüylerle de kaplıydılar, ama yine de sürüngenler gibi yumurtluyorlardı.

O halde çok muhtemel görünüyor ki *cynodont*'lar yüksek bir aerobik kapasiteye zaten sahiptiler ve bu aerobik kapasite onlara büyük bir dayanıklılık kazandırıyor olsa gerekti, peki ya dinlenme sırasındaki metabolik hızları nasıldı? Onlar da mı sıcakkanlıydı? John Ruben'e göre, solunum yolları, dinlenme sırasındaki metabolizma hızının yüksek olmasının birkaç güvenilir işaretinden biridir. Solunum yolları, kısa süreli faaliyet patlamalarının aksine, sürekli yoğun soluma sırasında ciddi olabilecek su kaybını sınırlarlar. Sürüngenlerin dinlenme sırasındaki metabolik hızları çok düşük olduğundan, dinlenme sırasında çok hafif nefes alırlar ve su kaybını sınırlamaya pek ihtiyaçları yoktur. Sonuçta, bilindiği kadarıyla hiçbir sürüngenin solunum yolu yoktur. Oysa hakikaten sıcakkanlı bütün yaratıkların solunum yolları vardır, primatlar ve bazı kuşlar gibi birkaç istisna bulunsa da. Açık ki mutlaka gerekli olmasalar bile solunum yollarının bir katkısı olmuştur, fosillerdeki varlıkları da sıcakkanlılığın kökenleriyle ilgili iyi bir ipucudur. Kürkün de muhtemelen (fosillerde gözlenmekten ziyade çıkarsanan) varlığıyla birlikte ele alındığında, öyle görünüyor ki *cynodont*'lar memeli soyu üzerinde bir noktada gerçekten de sıcakkanlı olmaya evrilmiştir.

Ama bütün bunlara rağmen, *cynodont*'lar çok geçmeden kendilerini dezavantajlı durumda bulmuşlardır, nihayetinde "Trias

Çağı'nın sonlarındaki bir ele geçirme" sırasında her yeri fetheden *archosaur*'lar tarafından sindirilmişlerdir. *Cynodont*'lar o tarihte çoktan evrilip sıcakkanlı oldularsa, onlara galebe çalanlar, çok geçmeden ilk dinozorlara evrilenler ne alemdeydiler acaba? *Archosaur* çağından son hayatta kalanlardan timsahlar soğukkanlı, kuşlar sıcakkanlıdır. İlk kuşlara uzanan yolun bir noktasında, *archosaur*'lar evrilip sıcakkanlı olmuştur. Ama hangileri ve neden? Hem bunlar arasında dinozorlar da var mıydı?

Burada durum daha karmaşık bir hal alır, zaman zaman da hararetili bir tartışma sergiler. Dinozorlar gibi kuşlar da bilim kılığına bürünmüş birtakım tutkulu görüşleri üzerlerine çekmiştir. Uzun süre boyunca bir şekilde dinozorlarla, özellikle de *Tyrannosaurus rex*'i de içeren *theropoda* denilen bir grupta ilişkili görülen kuşların soyu, 1980'lerin ortalarına uzanan bir dizi sistematik anatomik (kladistik) çalışma sayesinde *theropoda* soyu içine açıkça yerleştirilmiştir. Bu çalışmaların ortaya koyduğu büyük sonuç şuydu: Kuşlar dinozorlarla ilişkili olmakla kalmıyordu, düpedüz dinozorlardı, uçan *theropod*'lardı. Çoğu uzman bu sonuçlara ikna olduysa da, North Carolina Üniversitesi'nde çalışan seçkin paleornitolog Alan Fedduccia'nın başını çektiği gürültücü bir azınlık, kuşların, *theropoda*'nın evrimi öncesinde ayrılan daha önce açıklanmamış bir gruptan türediği görüşünü savunur. Bu görüşe göre, kuşlar dinozor değildir; onlar benzersizdir, kendi başlarına bir sınıftır.

Bu satırları yazdığım tarih itibarıyla, bu çalışma dizisindeki en son araştırmanın, aynı zamanda en renkli araştırma olduğunu söyleyebilirim. Morfolojik özelliklerden çok proteinlerle ilgili bir araştırmadır bu. 2007'de Harvard Tıp Okulu'nda John Asara'nın başkanlığındaki bir ekibin gerçekleştirdiği inanılmaz bir keşifle, istisnai derecede iyi korunmuş 68 milyon yaşındaki bir *T.rex* kemiğinde hâlâ kolajen parçaları, yani kemiğin başlıca organik bileşenine ait parçalar olduğu görüldü. Ekip birkaç parçadaki amino asitlerin dizilimini çıkarmayı başardı, sonra bunları bir araya getirerek *T. rex*'teki bu proteinin bir dizilimini elde etti. 2008'de bu dizilimi, memeliler, kuşlar ve timsahlardaki eşdeğer

dizilimlerle karşılaştırdılar. Bu dizilimler kısıydı, dolayısıyla da yanıltıcı olmaları olasıydı, ama dışarıdan bakıldığında, *T. rex*'in yaşayan en yakın akrabasının tavuk olduğu, onu devekuşunun izlediği görülüyordu. Hiç şaşırtıcı değil, bu haber, *T. rex* bifteğinin lezzetinin nasıl olacağını sonunda öğrendiklerine memnun olan gazetelerde bir onaylama curcunasıyla karşılandı. Ama asıl önemlisi, kolajen araştırması, kuşları *theropod* dinazorlar olarak sınıflandıran kladistik tabloyu büyük ölçüde destekliyordu.

Kuşlar dünyası hakkında kopan hınçlı tartışmaların diğer büyük sebebi tüyledir. Feduccia ve diğerleri uzun süredir, tüylerin kuşlarda uçmak için evrildiğini, onlara rahatsız edici derecede mucizevi bir mükemmellik hissi verdiğini söylüyor. Ama tüyler uçmak için evrildiyse, o zaman *T. rex* gibi uçmayan *theropod*'larda kesinlikle bulunmamaları gerekir. Feduccia'ya göre, bulunmazlar da; ama geçen on yıl içinde Çin'den bir tüylü dinazorlar geçidi çıkmıştır. Bunların bazıları biraz şaibeli olsa da, uzmanların çoğunluğu, *T. rex*'in bir atası da dahil olmak üzere uçamayan *theropod*'ların da tüyleri olduğuna ikna olmuştur.

Buna alternatif görüş, "tüyler" in göründükleri gibi olmadığı, aslında ezilmiş kolajen lifleri olduğu görüşü özel bir savunmamış hissi vermektedir. Tüyler kolajen liflerinden ibaretlerse, çoğunlukla, *Jurassic Parc* filmiyle ünlenen *Velociraptor*'un da dahil olduğu, yırtıcı kuşlar olarak bilinen bir *theropoda* grubunda bulunmalarını açıklamak zorlaşır. Tüylerin neden fosilleri aynı tabakada korunmuş olan, tamamen tüylenmiş kuşların tüyleri gibi göründüklerini açıklamak da öyle. Tüyler tüylere benzemekle kalmıyordu, bazı yırtıcı kuşlar, en başta da *Microraptor* dört uzvunun (daha iyi bir sözcük istiyorsanız, kanat deyin isterseniz) dördünden de fişkıran tüylerin yardımıyla ağaçlar arasında süzûlebiliyordu. Bu gayet güzel korunmuş tüylerin tüy olmadıklarına inanmakta zorlanıyorum, Feduccia bile insafa gelmiştir. *Microraptor*'un ağaçlar arasında süzûlerek yaptığı uçuş, bildiğimiz kuşların ya da en yakın akrabaları *Archaeopteryx*'in uçuşunun kökenlerine işaret edebilir mi edemez mi henüz bilinmiyor.

Tüylerin *theropod*'larda uçuşun kökeninden önce evrildiği so-

nucu, kuşlarda tüylerin embriyonik gelişimi, özellikle de timsah embriyonlarının derileriyle ilişkileri hakkındaki çalışmalarla da desteklenmiştir. Timsahların yaşayan *archosaur*'lar, ilk kez Trias Çağı'nda ortaya çıkmış hakim kertenkeleler olduğunu hatırlayalım. Timsahlar ve (kuşlar da dahil) dinazorlar Trias Çağı'nın ortalarında, yaklaşık 230 milyon yıl önce farklılaşmaya başlamışlardır. Ne var ki bu farklılaşma kadim olsa da, timsahlarda tüylerin "tohumları" bulunur, kuşlarda gelişip tüye dönüşen embriyonik deri tabakalarını, bunların yanı sıra doğal olarak hafif, esnek ve güçlü olan "tüy keratinleri" denilen aynı proteinleri korurlar.

Tüy keratinleri çoğunlukla timsah derisinin bazı embriyonik tabakalarında bulunur, bu tabakalar kuluçka sonrasında deri değiştirme sırasında gider ve pullar ortaya çıkar (bu keratinlerin kalıntılarına yetişkin timsahların pullarında da rastlanır). Kuşların da bacaklarında ve ayaklarında benzer pullar vardır, doğumdan sonra dış deri tabakaları döküldüğünde bu pullar da ortaya çıkar. Bologna Üniversitesi'nde tüylerin evrimsel gelişimi üzerine çalışan bir uzman olan Lorenzo Alibardi'ye göre tüyler, pullar oluşurken dökülen aynı embriyonik tabakalardan çıkar. Embriyonik pullar uzayarak tüpsü liflere, yani tüylere, içi boş, saça benzer yapılara dönüşür; canlı duvarları embriyonik deri tabakalarından oluşmuştur, uzunlukları boyunca her yerden dallanabilirler.⁷ En basit tüyler, alt tüyler esasen aynı noktaya bağlanmış tüy perçemleridir, uçmaya yarayan tüylerse orta bir eksenle birleşen tüylerden oluşur. Tüpsü liflerin yaşayan duvarları keratin bırakır, sonra da bozulur ve keratinden oluşan dallanan bir yapıyı ortaya çıkarır: kuş tüyü. Büyüyen kuş tüyleri mevcut deri tabakaları ve proteinlerle örtüşmekle kalmaz, bunun için gerekli genler de timsahlarda bulunur, muhtemelen ortak *archosaur* atalarında da bulunuyordu. Sadece gelişim programları değişmiştir. Tüyler ile pullar arasındaki yakın embriyolojik ilişkiyi, pulların, kuşların bacaklarından fıskıran tüylere dönüşmesine neden olan tuhaf, çok tuhaf bir mutasyon ele vermiştir. Ama şimdiye kadar tüylü bir timsah gören olmadı.

Bu bakış açısıyla yaklaşıldığında, öncü tüyler ilk *archosa-*

ur'ların derisinden bile neredeyse fışkırıyordu, bu yüzden *theropod*'ların, (*pterosaur*'larda olduğu gibi) sert kıllardan tutun alt kısım tüylerine benzer basit dallanan yapılara uzanan "epidermal uzantılar" çıkarmaya başlamış olması olasılığı pek şaşırtıcı değildir. Peki ama bunlar uçmak için değilse ne için kullanılıyordu? Hiçbir şekilde birbirini dışlamayan, akla yatkın birçok cevap vardır: cinsel gösteriş, duyuşal işlevler, korunma (tüpsü liflerin boyutları büyüyebilir ve ayrıca oklu bir kirpinin okları gibi saplanma özelliğine de sahip olabilirler) ve tabii yalıtım bu cevaplar arasındadır. Tüylü *theropod*'lar curcunası hiç kuşkusuz, bunların yaşayan akrabaları kuşlar gibi sıcakkanlı olabilecekleri olasılığını gündeme getirmektedir.



Başka kanıtlar da *theropod*'ların faal bir dinazor grubu olduğu fikriyle örtüşmekte, en azından dayanıklılığa sahip olduklarını düşündürmektedir. Kanıt niteliğindeki bu özelliklerden biri kalptir. Kertenkeleler ve çoğu sürüngenin tersine, timsahlar ve kuşların dört odacığı bulunan güçlü kalpleri vardır. O halde dört odacıklı kalbin bütün *archosaur*'ların, dolayısıyla dinazorların da miras aldığı bir özellik olması muhtemeldir. Kalbin dört odacığının olması önemlidir, çünkü dolaşım sistemi böylece ikiye ayrılabilir. Kalbin yarısı akciğerleri besler, diğer yarısıysa bedenin geri kalan kısmını. Bu durum iki önemli avantaj sağlamaktadır. Öncelikle, kan akciğerlerin hassas dokusuna hasar vermeksizin (pulmoner ödem ve muhtemel ölüme yol açmaksızın), yüksek basınçla kaslara, beyne vs. pompalanabilir. Açıktır ki kan basıncının yüksek olması daha faal olmayı, ayrıca çok daha büyük boyutlara sahip olmayı destekler. Büyük dinazorların dört odacıklı bir kalbi olmasaydı, beyinlerine hiçbir şekilde kan pompalanmış olmazdı. İkincisi, dolaşım sisteminin ikiye ayrılması oksijenli kanla, oksijensiz kanın hiçbir şekilde birbirine karışmadığı anlamına gelir: Oksijenli kan akciğerlerden gelir ve hemen yüksek basınçla bedenin geri kalan kısmına pompalanır, ihtiyaç duyulan yerlere en yüksek seviyede oksijen dağıtılır. Dört odacıklı kalp

mutlaka sıcakkanlılık anlamına gelmese de (ne de olsa timsahlar soğukkanlıdır), böyle bir kalbe sahip olmaksızın yüksek bir aerobik kapasiteye sahip olmak imkansızlık sınırına yakındır.

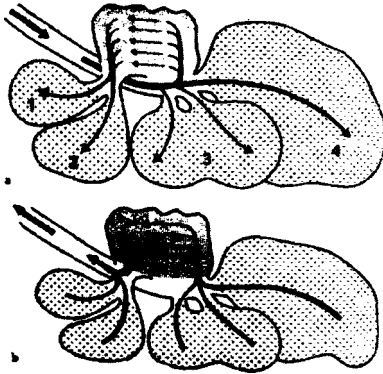
Theropod dinozorların solunum sistemleri de kuşlarınkine benzer görünmektedir, bu solunum sistemlerinin yüksek hızda faaliyeti desteklemiş olması mümkündür. Kuşların akciğerleri bizim akciğerlerimizden farklı işler, alçaklarda bile daha verimlidir. Yüksek irtifada solumada farklılık gözlenir. Kuşlar seyrelmiş havadan, memelilere göre iki ya da üç kat daha fazla oksijen alabilirler. İşte bu yüzden göç eden kazlar, Everest'in zirvesinden birkaç yüz metre yukarıda uçarlarken, memeliler aynı irtifada nefes almak için yırtınırlar.

Bizim akciğerlerimizin yapısı içi boş bir ağaca benzer; hava, içi boş gövdeden (nefes borusu) girer, sonra kollardan birine (ana bronşlar) sapar ve çıkmaz sokak olan bronşlara ulaşır. Bronşlar keskin noktalar olarak son bulmaz, yarı şişirilebilir balonlarla, alveollerle biter; alveollerin duvarları minicik kılcal damarlarla doludur, işte burada gaz takası yapılır. Burada kırmızı kan hücrelerindeki hemoglobin karbondioksitini bırakır, oksijen yüklenir ve tekrar kalbe geri döner. Bu balon sisteminin tamamı soluma sayesinde, gücünü kaburga kafesi ve diyaframdaki kafeslerden alarak körük gibi şişer, sonra da söner. Kaçınılmaz zayıflık şudur ki bu ağaç ölü bölgelerle sonlanır, temiz havaya en fazla ihtiyaç duyulan yerde hava pek az takas edilir. Temiz hava buralara ulaşsa bile, dışarı çıkış yolundaki kötü havayla karışmıştır.

Oysa kuşlarda güzel bir biçimde değişmiş sürünge akciğerleri bulunur. Standart sürünge akciğeri hayli basittir: Gerçekten de büyük bir torbadan ibarettir, septa denilen, ana oyuğu bölen bıçak ağzını andıran doku tabakalarıyla bölünmüştür. Memeli akciğeri gibi sürünge akciğeri de ya kaburga kafesinin genişlemesi ya da, timsah örneğinde olduğu gibi, karaciğere bağlı olup pubik kemiğe sabitlenmiş kaslarla geri çekilen piston benzeri bir diyafram sayesinde körük gibi işler. Bu da timsah akciğerinin biraz şırıngaya benzemesine neden olur, diyaframsa geri çekilerek akciğeri dolduran hava geçirmez bir piston benzer. Bu,

bir hayli kuvvetli bir nefes alma yöntemi olsa da, kuşlar daha da ileri gitmişler ve bedenlerinin yarısını birbiriyle bağlantılı hava keseciklerinden oluşan tek yönlü, sofistike bir sisteme çevirmişlerdir. Hava, doğrudan ciğerlere girmek yerine hava kesecikleri sistemine girer ve ciğerlerden çıkar, bizim çıkmaz alveollerimizdeki ölü yerler bulunması sorununu ortadan kaldıran sürekli bir hava akışı sağlar. Hem nefes alma hem nefes verme sırasında, alt kaburgalar ve hava kesesi sisteminin arka kısmının hareketi sayesinde, hava (kuşlarda yine daha gelişmiş bir görünüm sergileyen) septadan geçer; kritik önemde bir nokta da kuşlarda diyafram bulunmamasıdır. Üstelik hava tek yönlü akar, kan akışı ise ters yöndedir, gaz transferini en üst seviyeye çıkaran bir “karşıt akım” değiş tokuşu söz konusudur (Şekil 8.1).⁸

Alanın yıllardır hırçınlıkla bölünmüş olmasına yol açan sorudur: *Theropod*’ların akciğerleri nasıldı? Timsahlarınkı gibi pistonu mu benziyorlardı, yoksa kuşlarınkı gibi tek yönlü bir hava akışına elveren akciğerler miydi? Kuşlardaki hava kesecikleri sistemi sadece karındaki ve göğüs bölgesindeki yumuşak dokuları işgal etmekle kalmaz, kaburga kemikleri ve omurga da dahil olmak üzere kemiklere de yayılır. *Theropod*’ların kemiklerinde, kuşlarla aynı yerlerde boşluklar olduğu uzun zamandır biliniyor; kışkırtıcı paleontolog Robert Bakker 1970’lerde başka bulguların yanı sıra bu bulguyu da kullanarak dinozorları faal, sıcakkanlı hayvanlar olarak yeniden resmetmişti; Michael Crichton’ın kitabına, daha sonra *Jurassic Parc* filmine esin kaynağı olan devrimci bir düşünceydi bu. Oysa John Ruben ve meslektaşları *theropod* akciğerlerini farklı, timsah akciğerlerine çok daha yakın bir biçimde resmetmişlerdir; onlara göre *theropod* akciğerlerinde bir-iki fosilde tanımlanabilir olduğu düşünülen pistonsu bir diyafram vardır. Ruben *theropod* kemiklerinde hava keseciklerinin varlığını yadsımaz, sadece amaçlarına karşı çıkar; orada bulunma sebeplerinin nefes almak değil başka şeyler olduğunu söyler: ağırlığı azaltmak ya da belki de iki ayaklı hayvanların dengeyi sağlamasına yardımcı olmak gibi sebepler. Bu anlaşmazlık yeni veriler olmaksızın uygun bir çözüme bağlanamadan devam edip



Şekil 8.1 Kuşların ciğerlerinde (a) nefes alma, (b) nefes verme sırasında (1) klaviküler hava keseciği (2) kranyal torasik hava keseciği (3) kodal torasik hava keseciği (4) abdominal hava keseciği sırasında hava akışı. Hava akciğerden sürekli aynı yönde akar, kan da diğer yönde, böylece son derece etkili bir karşı gaz akışı oluşur.

gitmiştir, ta ki 2005'te o sıralarda Ohio Üniversitesi'nde çalışan Patrick O'Connor ile Harvard Üniversitesi'nde çalışan Leon Claessens'in çıkır açan bir makalesi *Nature* dergisinde yayınlanıncaya dek.

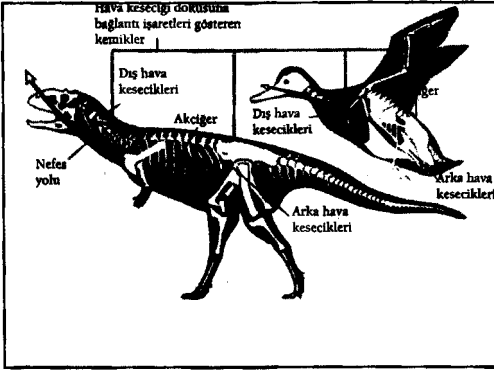
O'Connor ve Claessens, yaşayan birkaç yüz kuşa (ya da onların deyişiyle yaban hayatı ıslahçılarından ve müzelerden "kurtarılan numuneler"de) hava kesesi sistemlerini ayrıntılı bir biçimde incelemeye soyunmuşlardı. Soluma sistemini daha iyi anlamak için bu kuşların hava keseciklerine kauçuk enjekte etmişlerdi. İlk fark ettikleri şey, sistemin sandıklarından daha fazla yere nüfuz ettiği, boyun ve göğsün bazı kısımlarının ötesinde karın oyugunun büyük bölümüne uzandığı, oradan omurganın alt kısmına yayıldığı olmuştur. *Theropod*'ların iskelet anatomisinin anlaşılması açısından kritik önemde bir ayrıntıydı bu. Arkada, kuyruktaki bu hava kesesi kuşlardaki soluma sisteminin ardındaki asıl itici güçtür. Nefes alma sırasında sıkışır, havayı arkadan akciğerlere sıkıştırır. Yeniden genişlediğinde, kuyruktaki hava keseciği göğüsteki ve boyundaki bağlantılı hava keseciklerinden hava çeker. Konuşma diliyle söylersek, bir *emme pompası*dır. Biraz gayda gibi işler, torbanın içine üflenmiş hava, melodi düdüğünde sürekli bir hava akışı yaratır.

O'Connor ve Claessens bulgularını kuşlarla uzaktan akraba bir *theropod* olan *Majungatholus atopus*'un muhteşem iskeleti de dahil olmak üzere fosil *theropod*'ların kemik yapısına da uygu-

lamışlardır. Çoğu araştırma yüksek omurgalılar ve kaburgaların kemik yapısına odaklanmış olsa da, O'Connor ve Claessens *theropod*'larda karındaki hava keseciklerinin kanıtı olarak omurganın alt kısımlarında da boşluklar aramışlar ve de bulmuşlardır, tam da kuşlarda olduğu yerde. Sadece bu da değil, omurganın, göğüs kafesinin ve göğüs kemiğinin yapısı da bir emme pompasının özelliklerine denk düşmektedir: Alt kaburga kemiklerinin ve göğüs kemiğinin daha esnek olması, kuşlarda olduğu gibi akciğerleri arkadan şişirebilen kuyruktaki bir hava keseciğinin sıkışmasını mümkün kılar. Nereden bakılırsa bakılsın, *theropod* dinozorların gerçekten de kuşlar gibi bir emme pompasına sahip olduğu pek su götürmez, omurgalıların tamamında rastlanan en verimli soluma sistemidir bu (Şekil 8.2).

Demek oluyor ki *theropod*'ların tüyleri, dört odacıklı kalpleri ve içinden hava geçen akciğerleri destekleyen hava kesecikleri vardı; bütün bunlar onların dayanıklılık gerektiren faal hayatlar sürdüğünü düşündürür. Peki dayanıklılık, aerobik kapasite varsayımının savunduğu gibi kaçınılmaz olarak sıcakkanlılığa yol açmış mıydı? Yoksa *theropod*'lar bir durak noktası, bugünkü timsahlarla kuşlar arasında kalan bir tür müydü? *Theropod*'ların tüyleri yahtımı, dolayısıyla sıcakkanlılığı düşündürüyor olsa da başka amaçlara da hizmet etmiş olabilirler; solunum yolları da dahil olmak üzere daha başka kanıtlar daha muğlaktır.⁹

Memelilerde olduğu gibi kuşlarda da çoğunlukla solunum yolları bulunur, ama bunlar memeli çeşitlerinde olduğu gibi kemikten değil, fosil kayıtlarında pek iyi korunmayan kıkırdaktan oluşur. Pek az fosil, bir karara varacak kadar iyi korunmuş olsa da, bugüne kadar *theropod*'larda solunum yolu işaretine rastlanmamıştır. Ama daha manidar bir nokta, John Ruben'in işaret ettiği üzere kuşlarda solunum yollarının değişmez bir biçimde genişlemiş burun delikleriyle ilişkili olmasıdır. Muhtemeldir ki solunum yollarının hassas kafes işi, hava akışını bir ölçüde engeller, bu durum da kanalların genişletilmesiyle düzeltilebilir. Ama *theropod*'larda özellikle geniş burun kanalları yoktur, bu da solunum yollarının belirgin eksikliğinin fosil kayıtlarının korun-



Şekil 8.2 Majungatholus atopus gibi bir dinozordaki hava kesecığı sistemliyle kuşlardaki sistemin karşılaştırılması. Her iki durumda da akciğer dış ve arka hava kesecikleriyle desteklenir, bunların dinozor kemiklerindeki izleri kuşlardakinin aynısıdır. Hava kesecikleri havayı sert akciğerden geçirmeye yarayan körükler gibi işler.

mamasından kaynaklanan bir sonuç değil, bir gerçek olduğunu düşündürür. *Theropod*'ların solunum yolları yoksa, sıcakkanlı olmaları mümkün müydü? Bizde yok ve biz sıcakkanlıyız, dolayısıyla bu soruyu teknik olarak "evet" diye cevaplamak mümkün, ama sorgulamamız gerekiyor.

Rubens, kendisinin geliştirdiği aerobik kapasite varsayımı, aerobik kapasite ile sıcakkanlılık arasında bir ilişki olması gerektiğini ileri sürse bile, *theropod*'ların yüksek bir aerobik kapasiteye sahip olduğuna, ama sıcakkanlı olmadığına inanır. Henüz elimizde kesin cevap verecek kadar yeterli bilgi bulunmasa da, şimdiye kadar olduğu kadarıyla hemfikir olunan nokta şudur: *Theropod*'ların muhtemelen dinlenme sırasındaki metabolik hızları yüksekti, ama henüz gerçekten sıcakkanlı olmamışlardı. En azından fosil kayıtlarının ortaya koyduğu hikaye budur, ama kayalarda antik iklim ve atmosfer koşullarıyla ilgili veriler de dahil olmak üzere, fosillerde bulunan verilerden daha fazlası mevcuttur. Trias Çağı'nın havasında da fosil kayıtlarını farklı bir yöne sokan bir şey vardı. İşte bu şey sadece *cynodont*'lar ve *theropod*'ların yüksek aerobik kapasitesini değil, dinozorların neden dünyaya hakim olduğunu da açıklamamızı sağlar.



Fizyoloji tartışmalarının çoğu, tarihsel bir boşlukta geçer: Dile getirilmemiş bir varsayımla, geçmiş şimdinin aynısı gibi görü-

lür, seçim baskılarının kütleçekim kadar değişmez olduğu sanılır. Ama büyük tükenişlerin de ortaya koyduğu üzere, durum hiç de öyle değildir. Bütün tükenişlerin en büyüğü de Permiyen Çağı'nın sonunda, yaklaşık 250 milyon yıl önce yaşanmış, hakim kertenkelelerin direnilemez yükselişinin perdesi açılmış ve sonra da dinazorlar çağı başlamıştır.

Permiyen tükenişi sıklıkla hayatın büyük gizemlerinden biri olarak görülür (burs paraları çekmeye yarayan başka şeyler dışında tabii), ama çevresel geçmiş kalın fırça darbeleriyle çizilmiştir. Aslına bakılırsa, bir tek kitlesel tükeniş değil, yaklaşık 10 milyon yıl arayla iki büyük tükeniş yaşanmıştı, ümitsiz bir gerileme çağıydı bu. Her iki tükeniş de volkanik huzursuzluğun uzun süreli olduğu, gezegenin tarihindeki en yoğun lav fışkırmalarının görüldüğü, neredeyse kıta büyüklüğünde geniş bölgelerin derin bir bazalt tabakasının altında kaldığı bir dönemde gerçekleşmişti. Lav akışları aşındırmayla "trap" olarak bilinen step bölgelerin oluşmasına yol açmıştı. Volkanik patlamalar dizisinin ilki 260 milyon yıl önce Çin'de Emei steplerini, ikincisi de 8 milyon yıl sonra daha büyük bir patlamayla Sibiry steplerini oluşturmuştu. Kritik önemde bir nokta, hem Emei hem Sibiry volkanik akışlarının karbonlu kayalar ve kömür içeren tabakalardan geçerek patlamış olmasıdır. Bu önemlidir, çünkü son derece sıcak lavlar binlerce yıl boyunca devam eden her bir patlamada karbonla tepkimeye girerek muazzam miktarda karbondioksit ve metan salımına yol açmıştır.¹⁰ Bu da iklimi değiştirmiştir.

Permiyen tükenişlerinin ardındaki katili ortaya çıkarmak için birçok girişimde bulunulmuş, küresel ısınma, ozon tabakasının erimesi, metan salımı, karbondioksit yüzünden boğulma, oksijen yoksunluğu, hidrojen sülfat zehirlenmesi vs. gibi gerekçeler kuvvetle ileri sürülmüştür. Az çok dışarıda bırakılan bir gerekçe bir göktaşının etkisidir. Bundan yaklaşık 200 milyon yıl sonra, dinozorların uzun süren hakimiyetini sona erdirerek perdeyi indiren göktaşı çarpmasına benzer bir olaya ilişkin pek kanıt bulunamamıştır. Ama listenin geri kalanı epeyce akla yatkındır, son

birkaç yılda da büyük bir ilerleme sağlanarak bütün bunların yakından ve geri döndürülemez bir biçimde ilişkili olduğu anlaşılmıştır. Emei stepleri ölçeğinde bir volkanik patlama, amansız bir hızla ilerleyen bir koşullar dizisini başlatır, insanın kalbini titretecek bir ilerlemedir bu. Benzer karşılıklı bağımlılık dizileri bugün bizim dünyamızı da tehdit ediyor, ama henüz o zamanla karşılaştırılabilir boyutlarda değil.

Yanardağlar stratosfere metan ve karbondioksit, ayrıca başka gazlar salıyordu, bunlar ozon tabakasına hasar verdiler ve nihayetinde dünyayı ısıtıp kuruttular. Büyük Pangea kıtası boyunca çorak topraklar uzanıyordu. Önceki dönemlerin Kömür ve Permien çağının büyük kömür bataklıkları kurumuş, rüzgarda savrulmaya başlamıştı, bu bataklıkların oksijeni tüketen karbonları havanın hayat veren niteliğini çekip alıyordu. On milyonlarca yıl içinde, oksijen düzeyi yüzde 30'dan yüzde 15'in altına geriledi, yavaş çekim ilerleyen bir gerilemeydi bu. Suların ısınması (böylece oksijenin çözünürlüğünün sınırlanması) ve atmosferdeki oksijen düzeyinin gerileyip karbondioksit düzeyinin yükselmesi denizlerdeki hayatı söndürdü. Sadece bakteriler yaşadı, bitkiler ve hayvanların ortaya çıkması öncesinde bir zamanlar gezegenimize hakim olan türden zehirli bir bakteri türü, okyanuslar dolusu zehirli hidrojen sülfür gazı salıyordu. Denizler karardı, hayat söndü. Ölüp giden okyanuslardan çıkan gaz, havayı daha da kirletiyor, sahillerdeki hayvanların boğulmasına yol açıyordu. Sonra, bütün bunlardan sonra kaderin son darbesi de indi ve büyük Sibirya stepleri patladı; her beş milyon yılda bir çalan bir ölüm çanıydı bu. O beş milyon yıl boyunca, denizlerde ya da karada yaprak bile kıpırdamadı; sonra toparlanmanın ilk işaretleri görülmeye başlandı.

Kimler sağ kaldı? İlginçtir, bu sorunun cevabı denizlerde de karada da aynıdır: en iyi soluyanlar; düşük oksijen, yüksek karbondioksit düzeyine ve nahoş bir zehirli gaz karışımına en iyi ayak uyduranlar. Nefesini tutup hareket edebilecek donanıma sahip olanlar; deliklerde, inlerde, balçıkta, bataklıklarda, çökelti-lerde yaşayanlar, hayatlarını başka hiçbir şeyin yaşamak isteme-

yeceği yerlerde sürdürebilenler. Binlerce binlerce sümüksü şey yaşadı, biz de. Bu büyük ölüm sonrasında toparlanan ilk kara hayvanlarının geniş göğüslü, kassı diyaframlı, kemikli damaklı, hava kanalları ve solunum yolları genişlemiş *lystrosaur*'lar olması işte bu yüzden önemlidir. *Lystrosaur*'lar kokuşmuş inlerinden nefes nefese çıktılar ve boş kıtaları sincap misali ele geçirdiler.

Kayaların kimyasına yazılmış olan bu etkileyici hikaye milyonlarca yıl boyunca böyle devam edip gider; Trias Çağı'na damgasını vurur. Zehirli gazlar kayboldu, ama karbondioksit düzeyi yükseldi, bugünkünden on kat daha fazlaydı. Oksijen düzeyi inatla yüzde 15'in altında kaldı, iklime sonu gelmez bir kuraklık hakimdi. Deniz seviyesinde bile hayvanlar oksijen tutuyordu, bugün yükseklerdeki hava kadar seyrekti oksijen. Bu dünya ilk dinazorların dünyasıydı: Arka bacaklarının üzerinde ayağa kalkan, aynı anda hem yürüyüp hem nefes alamayan yayılmacı kertenkelelerin kısıtlamalarından akciğerlerini kurtarmış dinozorların. Hava keseciklerini ve emme pompasını da eklediniz mi dinozorların yükselişi kaçınılmazmış gibi görünmeye başlar: Washington Üniversitesi'nde çalışan paleontolog Peter Ward'un önemli kitabı *Out of Thin Air*'de inandırıcı ayrıntılarla sunduğu bir hikayedir bu. Ward, bölünmüş akciğer başarısının sırrını taşıdığından, kuşların muhteşem tek yönlü akciğerlerine dönüşme yönünde bilinmeyen gizli bir beceri taşıdığından, *archosaur*'ların dinozorların yerini aldığını söyler (ben de ona inanıyorum). Sürekli nefes alması gerekmeyen tek hayvan *theropod*'du. *Theropod*'ların solunum yollarına pek az ihtiyaçları vardı.

Bu yüzden de dayanıklılık fazladan bir özellik değil, can simidiydi, zorlu zamanları atlama şansına sahip kazanan biletti. Ama burada istemeyerek de olsa Ward'dan ayrılıyorum. Yüksek bir aerobik kapasiteye sahip olmanın hayatta kalmak açısından kritik önem taşıdığına katılıyorum, ama gerçekten de dinlenme sırasındaki metabolik hızı da yükseltmiş olabilir mi? Ward aerobik kapasite varsayımını aktararak öyle olduğunu ima ediyor, ama bugün hayvanlar yüksekte yaşarken böyle olmuyor. Tam tersine, kas kitlesi gerileme eğilimi gösteriyor ve sıırım gibi olan-

lar kazanıyor. Aerobik kapasite yüksek olabilir, ama dinlenme sırasındaki metabolizma hızı onunla birlikte artmaz, olsa olsa düşer. Fizyoloji zor zamanlarda genel olarak cimridir, saçıp savurmaz.

Trias Çağı'nda, hayatta kalmanın ödül olduğu o devirlerde hayvanlar gerçekten de dinlenme sırasındaki metabolik hızlarını gereksiz yere yükseltmiş olabilirler mi? Bu en azından sezgilerle ters geliyor. Öyle görünüyor ki *theropod*'lar aerobik kapasitelerini, en azından en başta tam anlamıyla sıcakkanlı olmaları gerekmeksizin artırmışlardı. Kırılıp giden *cynodont*'lar belli ki sıcakkanlı olmuşlardı. Bunu, pek başarı ümitleri olmasa da, güçlü kuvvetli *archosaur*'larla rekabet etmek için mi yapmışlardı? Yoksa bu durum, boyutları küçülürken, geceleri ayakta kalmaya başlarlarken faal kalmalarına mı yardımcı olmuştu? Her ikisi de son derece inandırıcı olasılıklardır, ama benim daha çok sevdiğim başka bir cevap var, dinazorların neden tam tersini yapıp, dünyanın bir daha hiç görmeyeceği devlere dönüştüklerine ışık tutabilecek bir cevap.



Tecrübelerim itibarıyla, vejetaryanların benden daha mübarek olmak gibi kötü bir eğilimleri var, belki de sadece benim etoburca suçluluk hislerimden ileri gelen bir fikirdir bu. Ama pek de bilinmeyen bir dergi olan *Ecology Letters* adlı dergiye 2008'de sessizce giriveren önemli bir makaleye göre, vejetaryanların benim itibar ettiğimden çok daha fazla övünecek şeyleri olabilir. Vejetaryanlar, daha doğrusu onların ataları otoburlar olmasaydı, bizlerin evrilip sıcakkanlı olması, onunla birlikte gelen hızlı hayatı yaşaması hiç mümkün olmayabilirdi. Hollanda Ekoloji Enstitüsü'nden Marcel Klaassen ve Bart Nolet'in kaleme aldığı makalede, et ile yeşillikler arasındaki farklılıklarla ilgili muhteşem derecede sayısal (teknik olarak "stoichiometrik") bir çizgi benimseniyor.

Alan dışından okurlar için bilim hakkında yazmanın görünmez tehlikelerinden biri de insanın aklına üşüşen görüntüleri

aktarmaya çalışmasıdır. “Protein” sözcüğünü kullanırken enzimler, amino asitler ve incelikli üç boyutlu yapıları düşünüyorum. “Peh peh peh! Biyokimyagere de bak!” dediğinizi duyar gibiyim. Oysa protein denince çoğu insanın aklına insanın ağzını sulandıran bir parça biftek gelir, ayrıca şu sonu gelmez aşçılık programları ve diyet rehberlerinin insanın zihninde proteinler ve et arasında çok güçlü bir bağlantının doğmasına neden olduğu da su götürmez. Protein almak için et yiyin, vejetaryansanız bol bol fındık fıstık, tohum ve baklagil yemelisiniz. Vejetaryanlar yiyeceklerin bileşimi konusunda genel olarak et yiyenlerden daha bilinçlidir. Besinlerimizden yeterince azot alabilmek için proteine ihtiyacımız vardır, kendimiz için taze protein, ayrıca DNA yapabilmemiz için azot gerekir, proteinler ve DNA azot bakımından zengindir. Aslında, vejetaryan bile olsak, dengeli beslenmeyi sürdürme konusunda pek sorun yaşamayız, ama biz zaten sıcakkanlıyız: Tanım itibarıyla çok yeriz. Klaassen ve Nolet bunun soğukkanlı hayvanlar için pek doğru olmadığını işaret ediyor. Onlar tanım gereği çok yemezler, bu da başlarına ilginç bir sorun açar.

Bugün kertenkelelerden pek azı otoburdur, 2700 yılan türünden bir tanesi bile otobur değildir. Elbette ki bazı kertenkeleler otoburdur, ama bunlar ya iguanalar gibi etobur kertenkelelere kıyasla daha büyük olma ya da onlardan daha fazla faal olma, vücut ısılarını daha yüksek tutma eğilimi gösterirler. Vücut ısılarını çabucak düşüren ve gerektiğinde uyku haline giriveren et yiyenlerin tersine, otobur kertenkelelerin esnekliği daha azdır ve canla başla çalışmaya devam etmeleri gerekir. Bu durum, geleneksel olarak bitkisel malzemeleri sindirmenin zorluğuyla ilişkilendirilmiştir; bitkisel malzemelerin sindirimi, inatçı bitkisel malzemeyi fermente edebilecek bağırsak mikroplarının yardımıyla gerçekleştirilir, yüksek ısıda daha iyi işleyen bir süreçtir bu. Ama Klaassen ve Nolet’e göre, tipik bitkisel maddenin azot içeriğiyle ilgili başka bir sebep daha olabilir. İkili, bir besinsel azot envanteri çıkarmış, otobur kertenkelelerin gerçekten de ciddi bir sorunu olduğunu doğrulamıştır.

Diyelim ki sadece, azot içeriği olmayan yeşillikler yiyorsunuz. Beslenmenizde yeterince azot almanız nasıl mümkün olur? Daha geniş bir yelpazede yemeyi, biraz leş atıştırmayı, biraz tohum yemeyi vs. deneyebilirsiniz, ama o zaman bile azot açığının muhtemelen kapanmaz. Ya da daha fazla yersiniz belki. Diyelim ki bir sepet yaprak yiyerek gündelik azot ihtiyacınızın sadece beşte birini karşılıyorsanız bu durumda tek yapmanız gereken beş sepet yaprak yemektir. Ama böyle yaparsanız vücudunuzda bir karbon fazlası oluşur, çünkü bitkiler karbon bakımından zengindir, sizin de bir şekilde bu karbondan kurtulmanız gerekir. Ama nasıl? Yakın gitsin, diyor Klaassen ve Nolet. Sıkı sıkıya otobur bir diyet, sıcakkanlı hayvanların mükemmel bir biçimde uygulayabileceği bir diyet, çünkü her zaman sepetler dolusu karbon yakarız, ama soğukkanlı hayvanlar için bu bir sorundur. İşte bu bağlamda otobur *lystrosaur*'lara ve hem otobur hem etobur *cynodont*'lara bir kez daha bakmamız iyi olabilir. Yüksek bir aerobik kapasiteleri (o zamanlarda hayatta kalmanın koşuluysa bu) ve ayrıca yeşillik bakımından zengin bir diyetleri olduğundan, sıcakkanlılık *cynodont*'larda evrilmiş olabilir mi? Sıcakkanlılık bu ilk otoburlarda evrildiğinde, bu fazladan enerjiden çabucak toparlanmak, yiyecek aramak ya da avcılardan kaçmak için çorak Trias Çağı topraklarında kilometrelerce uzaklara gitmek için kolayca yararlanmış olabilirlerdi. Avcıların beslenme gereksinimleri itibarıyla sıcakkanlılığa ihtiyacı daha azdı herhalde ve bu turbo yakıtlı otoburlarla eşit koşullarla rekabet etmeleri gerekiyordu. Belki de sadece vejetaryan Kırmızı Kraliçe'nin firarına ayak uydurmak için sıcakkanlı olmaya ihtiyaç duyuyorlardı.

Peki ya dev dinozorlar, tarihin en meşhur otoburları? Onlar aynı amaçlara ulaşmak için alternatif bir strateji mi izlemişlerdi? Beş sepet ot yerseniz, ama sürekli yakmazsanız bir yerlerde depolarsınız: Büyürsünüz, devleşirsiniz! Devlerin sadece daha fazla "depolama kapasitesi" yoktur, metabolik hızları da şaşmaz bir biçimde daha düşüktür, bu da protein ve DNA işleme işlemlerinin yavaşlaması, besin olarak azot ihtiyacının azalması anlamına gelir. Dolayısıyla yeşillik bakımından zengin bir diyetle

baş a çıkmanın akla yatkın iki yolu vardır: Boyutların büyümesi ve metabolizmanın yavaşlaması ya da boyutların küçülmesi ve metabolizmanın hızlanması. Bugün otobur kertenkelelerin benimsediğı stratejilerin tam olarak bunlar olması aydınlatıcıdır, bu kertenkelelerin doğuştan gelen düşük aerobik kapasiteleri gerçek bir sıcakkanlığa ulaşmalarını engelleyebilir olsa da. (Bu kertenkelelerin Permien tükenişinden nasıl sağ çıkabildiğı, başka bir yerde cevaplanması gereken başka bir sorudur.)

Peki o zaman dinozorlar neden bu kadar büyümüşlerdir? Birçok girişimde bulunulmasına rağmen bu soru, memnuniyet verici bir biçimde cevaplanmamıştır hiç. Jared Diamond ile meslektaşlarının 2001'de kaleme aldığı bir makalede geçen bir cümleye göre, cevabın o sıralarda karbondioksit düzeylerinin yüksek olmasında yatıyor olması mümkündür; bu durum muhtemelen asli verimliliğın artmasına, bitkilerin daha hızlı büyümesine yol açmıştır. Ne var ki Diamond'ın kavrayışı Klaassen ve Nolet'nin sunduğı, azotla ilgili perspektiften yoksundur. Karbondioksit düzeylerinin yüksek olması gerçekten de daha verimli olmayı beraberinde getirir, ama bitki maddesinin azot içeriğini de azaltır; bizim devrimizde karbondioksit düzeyinin yükselmesinin gezegenin beslenmesi üzerinde yol açacağı etkilerle ilgili kaygılar etrafında bir araştırma alanı oluşmuştur. İşte bu yüzden *cynodont*'lar ve dinozorların karşı karşıya olduğu sorun bugün olduğundan çok daha sertti, diyetlerinde yeterince azot almaları gerekiyordu, daha da fazla yeşillige ihtiyaçları vardı. Sıkı sıkıya vejetaryan olanların devasa miktarlarda yemesi gerekiyordu.

Herhalde bu durum, *theropod*'ların sıcakkanlı olmaya neden ihtiyaçları olmadığını da açıklıyor. *Theropod*'lar etoburdu, bu yüzden de azot dengesi sorunları yoktu. Ama hızlı hızlı soluyan, turbo yakıtlı otoburlarla eşit koşullarda rekabet etmek zorunda olan *cynodont*'ların tersine, *theropod*'lar bu gibi kaygıları aşmışlardı, onların süper verimli emme pompalı akciğerleri vardı. Hareket eden her şeyi yakalayabiliyorlardı.

Çok sonraları, Kretase Çağında bu tuhaf yırtıcı, vejetaryanlığa döndü. Anlaşıldığı üzere, ilk dönenlerden biri de *Falcarius*

utahensis denilen, Utah'tan bir ekip tarafından 2005'te *Nature* dergisinde biçimsel olarak tanımlanan bir *maniraptor*'du, makalenin yazarlarından Lindsay Zanno da gayri resmî bir tanımla, "son derece tuhaf bir devekuşu, goril ve Edward Scissorhands kırmaması" demişti. Ama kesinlikle kayıp bir halkaydı bu: Yarı yırtıcı, yarı otoburdu, ilk lezzetli çiçekli bitkilerin görüldüğü zamanlarda yaşamıştı, vejetaryan bir hayat tarzı için görülmemiş derecede baştan çıkarıcı bir dönemdi. Ama bu bölümde izlediğimiz bakış açısına göre, *Falcarius*'la ilgili en önemli gerçek, kuşların evrildiği sanılan bir gruba (*maniraptor*'lara) mensup olmasıydı. Kuşlarda sıcakkanlılığın evrimi de vejetaryan bir beslenmeye geçişle, dolayısıyla azotlu besinlere daha fazla ihtiyaç duyulmasıyla ilgili olabilir mi? Tümüyle mantık dışı bir seçenek değildir.

Bu bölümü bir spekülasyonla kapatıyoruz. Ama spekülasyonlar kolayca varsayım kılıfına bürünebilir, Peter Medawar, varsayımları, bilinmeyene doğru hayalî bir sıçrama olarak tanımlamıştı, iyi bilimin temeli de budur. Bu noktada incelenmesi ya da sınanması gereken çok şey bulunuyor, ama hızlı bir hayat sürmemizin gerekçelerini ortaya çıkarmak istiyorsak, fizyoloji ilkelerinin ötesine, hayatın kendi hikayesine, gezegenimizin tarihinde uç koşulların büyük bir rol oynadığı zamanlara bakmamız gerekebilir. Herhalde, bu bilimden çok tarihtir, zira olayların böyle olması gerekmemiş, ama böyle olmuşlardır. Permiyen tükenişi hiç olmasaydı ya da sonrasında oksijen seviyesi uzun süre boyunca düşük kalmasaydı, yüksek bir aerobik kapasiteye sahip olmak bir ölüm kalım meselesi olur muydu? Hayat ilkel sürüngen akciğerinin ötesine geçmeye zahmet eder miydi? Aerobik olarak güç alan bu hayvanların bazıları vejetaryan olmasaydı, sıcakkanlılık var olabilir miydi? Herhalde bunlar tarihtir, ama o uzak geçmişî okuyabilmek kendi başına bir bilimdir, hayat anlayışımızı zenginleştirmeye yarayacak bir bilim.

Bilinç

İnsan Zihninin Kökenleri



Papa II. Jean Paul 1996'da Papalık Bilimler Akademisi'ne, evrimin bir varsayımdan öteye geçtiğini kabul ettiğini belirten bir mesaj göndermişti. "Çeşitli bilgi alanlarında yapılan bir dizi keşfin ardından, araştırmacıların bu kuramı ilerici bir biçimde kabul etmeleri gerçekten de dikkat çekicidir. Bağımsız olarak gerçekleştirilen çalışmaların vardığı sonuçların yakınlığı, ki bu uğruna çalışılan bir şey de uydurulan bir şey de değildir, bu kuramı destekleyen önemli bir argümandır."

Fakat hiç de şaşırtıcı değil, Papa Dimyat'a pirince giderken evdeki bulgurdan olacak değildi. İnsan zihninin her daim bilimin alanı dışında kalacağını söylüyordu. "Kendilerine ilham veren felsefeler uyarınca zihni, canlı maddenin kuvvetlerinden doğmuş ya da bu maddeye bağlı ikincil bir olgu olarak değerlendirilen evrim kuramları insan hakkındaki hakikatle bağdaşmaz. Kişinin haysiyetine dayanak oluşturma yetisine de sahip değildir." İç deneyimler ve özbilincin, Tanrıyla iletişim kurmamızı sağlayan bütün metafiziksel aygıtların, bilimin nesnel ölçümlerinin işleyemeyeceği bir yerde durduğunu, daha ziyade felsefe ve ilahiyatın alanına girdiğini söylüyordu. Uzun sözün kısası, Papa evrim gerçeğini kabul ederken, Kilise Öğretisi'ni titizlikle ayırıp evrimin üstünde bir yere koyuyordu.¹

Elinizdeki kitap din hakkında değil, kimsenin dindarca izlediği inançlara saldırmak gibi bir arzum yok. Yine de tam da Papa'nın evrim hakkında yazmasına sebep olan gerekçeler yüzünden ("Kilise Öğretisi doğrudan evrim meselesiyle ilgilidir, çünkü evrim insan kavrayışını içerir.") bilim insanları zihinle ilgilidirler, çünkü zihin evrim kavrayışını içerir. Zihnin evrimin bir ürünü değilse, aslında nedir? Beyinle nasıl bir etkileşim içindedir? Beynin fiziksel olduğu aşikardır, bu yüzden de muhtemelen birçok yapının, hatta bütün yapıların ortak olduğu hayvan beyinleri gibi insan beyni de evrimin ürünüdür. Peki öyleyse beyin evrilirken zihin de evrilir mi, örneğin son birkaç milyon yıl içinde hominid kafataslarında beyin büyüklüğünün artması sırasında (ki bu kesinlikle bilimsel bir çekişme meselesi değildir) böyle bir evrim olmuş mudur? Madde ve ruh moleküler düzeyde nasıl bir etkileşim içindedirler? Etkileşim içinde olmaları gerekir, yoksa ilaçlar ya da beyindeki hasarların zihni etkilemesi nasıl mümkün olurdu ki?

Steven Jay Gould, Bilim ve Din'in birbiriyle örtüşmeyen iki Öğreti olduğunu yazmıştı, ama bu ikisinin kaçınılmaz olarak karşılaşması ve örtüşmesi gereken birkaç yer vardır, bilinç de en başta gelen örnektir. Bu meseleler tarihin derinliklerine uzanır. Descartes ruh ile madde arasında bir ayrım ileri sürerken, aslında kökleri antik dönemlere uzanan bir fikri biçimselleştirmekten başka bir şey yapmamıştı; dindar bir Katolik olarak Kilise'nin Galileo'ya reva gördüğü türden bir kınamayı midesi kaldırmazdı. Descartes bu ayrılığı resmiyete dökerek bedeni, hatta beyni bilimsel araştırmalar için özgürleştirdi. Papa'nın tersine, bugün pek az bilim insanı, ruh ile madde arasında bir ayrılığa inanmak anlamında açıktan açığa Kartezyen düalisttir, ama bu kavrayış saçma değildir, yukarıda sorduğum sorular da bilimsel araştırmaya açıktır. Örneğin, kuantum mekaniği, birazdan göreceğimiz üzere, zihnin derin kozmik gizemlerine hâlâ kapıyı aralamaktadır.

Papa'dan alıntı yapıyorum, çünkü onun sözlerinin dinin ötesine geçtiği, İnsan'ın kendi kendisini kavrayışının kalbine indiği kanısındayım. Dindar olmayanlar bile ruhlarının bir şekilde

ölümsüz, benzersiz derecede insani, bir şekilde “bilimin ötesinde” olduğunu hissedebilir. Buraya kadar okumuş olanların pek azı, bilimin bilinç üzerine ahkam kesmeye hiç hakkı olmadığını düşünecektir, ama herhalde yine birkaçı evrimcilere, robotbilim, yapay zeka, dilbilim, nöroloji, farmakoloji, kuantum fizigi, felsefe, ilahiyat, meditasyon, Zen, edebiyat, sosyoloji, psikoloji, psikiyatri, antropoloji, etoloji gibi bu konuda kavrayışlar sunabilecek diğer disiplinler karşısında özel haklar tanıyacaktır.

En baştan söyleyeyim: Bu bölüm bu kitaptaki diğer bölümlerden farklı, çünkü bilimin henüz cevabı bilmemesinin ötesinde, şimdilik bu cevabın bilinen fizik, biyoloji ya da enformasyon kanunları bakımından neye benzeyebileceğini de pek kavrayabilmiş değiliz. Zihin üzerine çalışmalar yürüten bilim insanları arasında, nöronların harekete geçmesinin tam olarak nasıl yoğun kişisel heyecanlara yol açabileceği konusunda bir fikir birliği yok. Ama bilimin bize insan zihninin işleyişi hakkında neler söyleyebileceğini, bu çabaların bilinmeyenin ördüğü bir duvarla nerede karşılaşacağını araştırmak için daha fazla gerekçe veriyor bize. Papa'nın benimsediği konum, savunulabilir bir konum olarak bende şaşkınlık yaratıyor, çünkü henüz “saf madde”nin zihnin algılanan gayri maddiliğini nasıl yarattığını henüz bilmiyoruz ya da hiçbir şey olmayacağına maddenin neden var olduğunu (bazı bakımlardan bilinçsiz enformasyon işleme yerine bilincin neden var olduğu sorusuna benzer bu soru) bilmiyoruz. Ama ben evrimin, zihnin en göksel abidelerini açıklayabileceğini düşünüyorum, belki de inanıyorum demem gerek.² Bu bölümde evrimsel mantık ve nörolojik kanıtların bu konumu neden desteklediğini göstermeye çalışacağım. Yavaş yavaş, yumuşak adımlarla ilerlemeye çalışacağım, çünkü hayaller (daha da beteri inançlar) üzerinde, insanlar olarak haysiyetimiz üzerinde yürüttüğümün farkındayım. Ama bana öyle geliyor ki insan zihninin işleyişi hakkında bilinenler, bu konuda hiçbir şey bilmeyen bir zihnin hayal bile edemeyeceği kadar harika, insanın haysiyetini biyolojik zihnin görkemine dayandırmak için her türlü gerekçe bulunuyor.

Bilimi bu güçlüğü göğüslemeye zorlayan başka gerekçeler de var. İnsan zihni her zaman o değer verdiğimiz zengin aygıt değildir. Beyin hastalıkları zihnin işleyişini bozar. Alzheimer hastalığı zalimce, bir insanın katmanlarını çözer, nihayetinde en derinlerinde varlıktan yoksun olduğunu ortaya koyar. Derin depresyon çok daha yaygındır, zihni içten içe kemiren kötücül bir üzüntüdür. Şizofreni en gerçek ve sert yanılsamaları çekip çıkarır, bazı sara nöbetleri bilinçli zihni tümüyle dağıtarak içteki zombiyi gözler önüne serer. Bu durumlar, insan zihninin hassasiyeti karşısında tüyleri ürpertir. Francis Crick “bir grup nörondan başka bir şey değilsiniz” gözleminde bulunmuştu, bu nöronların iskambil kartlarından hassas bir kule oluşturduğunu da ekleyebilirdi sözlerine. Toplum adına, tıp adına, bu gibi durumları anlayıp tedavi etmeye çalışmamak, Kilise’nin o kadar değer verdiği yardımseverliği esirgemek olur.

Bilince dair bilimsel bir değerlendirmenin karşı karşıya kaldığı ilk sorun, tanım sorunudur. Galler dağlarında sözcüklerin sisi ve buğusu içinde, sevgili dostlarımla bilincin anlamı üzerine keyifli sohbetler yaparak yıllarca dolandım durdum. Hiçbir şey bilmiyorsam, bilincin herkese her şeyi ifade ettiğini biliyorum. Bilinci, benliğin dünyaya gömülmüşlüğüyle ilgili derin bir farkındalık olarak tanımlarsak; bir bireyi toplum, kültür ve tarih bağlamında, hepsi de dilin yoğun, düşünümsel simgeselliğine bürünmüş geleceğe dair ümitleri ve korkularıyla birlikte tanımlayan zengin bir otobiyografik farkındalığın bilinç olduğunu söylersek, o zaman tabii ki insan benzersizdir. İnsanlar ile hayvanlar arasında giderek açılan bir uçurum vardır, hayvanların hiçbirisi de sözcüklerle donatılamaz, bizim atalarımız da küçük çocuklar da.

Herhalde bu görüşün en yüceltilmiş hali tuhaf bir kitapta, Amerikalı psikolog Julian Jaynes’in *The Origin of Consciousness in the Breakdown of the Bicameral Mind* adlı kitabında karşımıza çıkar. Jaynes iyi özetliyor: “Bir zamanlar, insan doğası ikiye bölünmüştü: Tanrı denilen yönetici kısım ile insan denilen takipçi kısım. İkisi de tam olarak farkında değildi.” Şaşırtıcı olan şey, Jaynes’in bu dönemi yakın bir tarihe yerleştirmesidir, İlyada’nın

yazılması ile Odyseia'nın yazılması arasında bir tarihe. (İnsanın "İkisi arasında çay saatine" diye espri yapası geliyor. Ama Jaynes tabii ki bu farklı destanların yüzlerce yıl arayla farklı Homeros-lar tarafından yazıldığını düşünüyor.) Burada asıl önemli nokta, Jaynes'e göre bilincin tümüyle sosyal ve dilsel bir inşa olmasıdır ve yakın zamanda ortaya çıkmış bir inşa olmasıdır. Zihin ancak bilinçli olduğunun *farkına vardığında* bilinçli olur, jeton düştüğünde yani. Bir argüman olarak iyi hoş da, çıtayı İlyada'nın yazarını dışarıda bırakacak kadar yukarı taşıyan bir argüman hiç kuşku yok ki çok yüksekte atıyordur. Büyük Homeros bilinçli değildiyse, bilinçsiz bir zombi miydi? Bilinçli değildiyse, en yüksek bilinç biçiminin, toplumun özgür ve okur yazar bir mensubunun özbilinci olduğu bir bilinçlilik yelpazesi olması gerekir. Bunda bir sorun görmüyorum, ama çıtayı bu kadar yukarı taşımanın hiçbir şey açıklamadığını belirtmem gerekiyor.

Bilinç meselesi üzerine derinlemesine düşünen çoğu bilim insanı, kökleri beynin yapısına uzanan iki bilinç biçimi arasında bir ayrım yapar. Terimler ve tanımlar farklılık gösterebilir, ama esasen "genişlemiş bilinç" insan zihninin, dil, toplum vs. olmaksızın kesinlikle edinemeyeceği ihtişamını ifade ederken; "aslı" ya da "çekirdek" bilinç daha hayvani bir şeyi ifade eder: duygular, saikler, acı, otobiyografik bir perspektiften yoksun kaba bir benlik algısı ya da bir ölüm hissi ve dünyadaki nesnelerin farkında olma. Dişli bir kapana yakalandığında kaçabilmek için kendi bacağı kemiren bir tilkinin dünyası. Hiç kuşku yok ki hayvan kapana kısıldığının farkındadır ve özgür kalmaya niyetlidir. Bir benlik farkındalığı vardır, bir planı da.

İroniktir ki genişlemiş bilinci açıklamak nispeten kolaydır, "kolay" kelimesini tanımlamam gerekse de. Demek istediğim, düşük düzeyli bir "farkındalık" hissi dikkate alındığında, genişlemiş bilinçte fiziksel dünya anlayışımızı çiğneyen bir şey yoktur; sadece toplumun karmaşık düzenine gömülmüş beyinde hayret verici derecede karmaşık bir paralel devre vardır. Örneğin, toplumun kendisinde mucizevi bir şey yoktur. Açıktır ki bir mağarada yalıtım içinde yetiştirilen bir çocukta ilkel bilinçten

fazlası olmayacaktır, aynı şekilde bugün Paris'te yetişen bir Cro-Magnon çocuğunun da Fransız çocuklardan ayırt edilemeyeceğini düşünebiliriz. Aynı şey dil için de geçerlidir. Çoğu insan, dili olmayan bir insan ya da bir türde gelişmiş bir bilinç biçimiyle karşılaşmanın akla hayale sığmayacağını düşündür, bu da neredeyse kesinlikle doğrudur. Ama dilde de sihirli bir şey yoktur. Dil bir robota da programlanabilir, öyle ki robot "bilinçli" hale gelmese de, temel bir farkındalığa sahip olmasa da bir zeka testinden (örneğin Turing testinden) geçebilir. Hafıza da programlanabilir, Tanrı'ya şükürler olsun, bilgisayarım yazdığım her kelimeyi hatırlıyor. "Düşünce" bile programlanabilir, satranç oynayan, ismini *Otostopçu'nun Galaksi Rehberi*'nden alan bilgisayar "Derin Düşünce"yi ve onun halefi "Derin Mavi"yi bir düşünün; Derin Mavi 1997'de dünya şampiyonu Gary Kasparov'u yenmişti.³ İnsanlar böyle şeyleri programlayabiliyorlarsa, doğal seçim de programlayabilir, bu konuda şüpheyne mahal yoktur.

Toplum, hafıza, dil ve insan bilincine yansımının önemini hiçbir şekilde küçümsemek istemiyorum: Besbelli ki insan bilinci hepsinin bir ürünüdür. Mesele şudur ki bilinçli olmak için, bunların hepsi de daha derin bir bilinç biçimine, duygulara dayanır. Derin Mavi'nin beyin gücüne, dış dünyayı algılayan sensörlere, sonsuza yakın bir hafızaya sahip ve dili olan, ama bilinci olmayan robotlar hayal etmek kolaydır. Neşesi olmayan, hüznü olmayan, sevgi duymayan, ayrılık acısını hissetmeyen, anlayışla kendinden geçmeyen, umut etmeyen, inancı ya da yardımseverlik hisleri olmayan, hafif bir kokuyla ya da tenin üzerindeki hafif bir ısıltıyla heyecan duymayan, boynunun arkasında güneşin sıcaklığını hissetmeyen, evden uzakta geçirilecek ilk yılbaşının hüznünü duymayan bir robot. Belki bir gün bir robot bütün bunları dişlilerinde hisseder, ama şimdilik acıyı nasıl programlayacağımızı bilmiyoruz.

Papa'nın, Kilise Öğretisi'nin alanına girdiğini söyleyerek etrafını çevirdiği, Avustralyalı filozof David Chalmers'ın da bilincin "zor problemi" olarak tanımladığı aynı iç hayattır bu. O zamandan bu yana, bilincin sorunlarını ele almak üzere, bazıları

bence başarılı birçok girişimde bulunuldu: Ama kanımca hiçbiri Chalmers'ın zor sorusunu ele almakta başarılı olamadı. Bu problemi tümüyle inkar etmekle suçlanan, tabu yıkan filozof David Chalmers bile aslında 1991 tarihli meşhur başyapıtı *Consciousness Explained*'de bu problemi ele almaktan kaçınır. Harekete geçen nöronların neden bir şey hissetmesi gereksin ki, diye sorar sonunda, öznel hislerle ilgili bölümü bitirirken. Aslında neden bunu sorgulamak gerekmesin ki?

Ben bir biyokimyagerim, haddimi de biliyorum. Bilincin şekillenmesinde dilin rolünü araştırmak istiyorsanız, iyisi mi gidip Steven Pinker'ı okuyun. Bilinç konusunda uzmanlık iddia edilecek alanlar listesine biyokimyayı dahil bile etmediğimi fark etmişsinizdir belki. Dikkat çekicidir ki pek az biyokimyager bilinç meselesini ciddi ciddi ele almaya çalışmıştır, Christian de Duve olası bir istisnadır. Ama bana öyle görünüyor ki bilincin görkemli yapısı, bir topluluğın başı üzerinde dans ediyor. Chalmers'ın zor probleminin biyokimyanın bir problemi olduğu su götürmez. Nöronların harekete geçmesi nasıl olur da bir şey "hissi" uyandırır? Bir zarın üzerinden akan kalsiyum atomları nasıl olur da kızarma, korku, öfke ya da sevgi hisleri doğurur? Bu soruyu cevaplayamam, ama çekirdek bilincin doğasını, genişlemiş bilincin neden ve nasıl çekirdek bilincin üzerine kurulması gerektiğini, çekirdek bilincin neden bir his uyandırdığını incelerken bu soruyu da aklımızda tutalım. Bu soruyu cevaplayamasam da, cevabı nerede arayabileceğimizi görecektik kadar açık bir çerçeveye oturtacağımı sanıyorum. Cevabın göklerde değil, burada dünyada, kuşlar ve arıların arasında olduğunu sanıyorum.



Yapmamız gereken ilk şey, bilincin görüldüğü gibi bir şey olduğu fikrinden kurtulmaktır. Bilinç görüldüğü gibi değildir. Örneğin bilinç yekpareymiş, parçalı değilmiş gibi görünür. Kafamızda akan ayrı bilinç ırmakları yoktur, tek bir bütünleşmiş algı vardır, ama o da sonsuzca değişir, anbean sonu gelmez bir haller çeşitliliği içinde yol alır. Bilinç kafada akan bir filmmiş gibi görünür,

resimler sadece seslerle değil, kokular, dokunuşlar, tatlar, duygular, hisler ve düşüncelerle, bir benlik hissiyle bütünleşmiştir. Bu öyle bir histir ki bütün varlığımızı ve varlığımızın deneyimlerini bedenimize çıpalar, kelimelerle tarif edilemez.

Beynin, duyuusal enformasyonu bir biçimde birbirine bağlıyor, dikiş yerleri belli olmaksızın birleşmiş bir bütünün sadece bir algısını veriyor olması gerektiğini fark etmek için uzun uzun düşünmenize gerek yoktur. Gözlerden, kulaklardan, burun deliklerinden, dokunma hissinden, hafızadan ya da bağırsaklardan gelen bilgiler beynin farklı kısımlarına girer, burada birbirlerinden bağımsız olarak işlenir ve nihayetinde farklı renk, tat, dokunuş, karın ağrısı algılarına yol açar. Bunların hiçbirisi de gerçek değildir: Sadece sinirlerimiz harekete geçmiştir, ama yine de “gördüğümüz” nesneleri nadiren tatlar ya da seslerle karıştırırız. Retina gerçekten de dünyanın ters bir imgesini oluştursa da, beyin bu görüntüyü kesinlikle bir film perdesinde görmez, görüntü daha ziyade faks makinesi gibi, görme sinirinde ateşleyen nöron örüntülerine dönüşür. Duyduğumuzda ya da kokladığımızda da büyük ölçüde aynı şey olur, dış dünyadan hiçbir şey kafamızın içine girmez, sadece nöronlar harekete geçer. Karın ağrısı için de aynı şey geçerlidir, sinirlerden başka gerçeklik yoktur.

Bütün bunları bilinçli olarak anbean, kafamızda oynayan bir tür multimedya filmi gibi tecrübe etmemiz, bütün dijital noktalar ve çizgilerin bütün görüntüleri ve kokularıyla bir “gerçek dünya” algısına dönüştürülmesini gerektirir. Sonra tabii ki bu yeniden inşa edilmiş dünyayı kafamızın içindeymiş gibi algılamayız, onu tekrar ait olduğu yere yansıtırız. Dünyayı tek gözlü bir dev gibi, kafatasımızın önündeki tek bir açıklıktan görüyor gibiyizdir, bunun bir yanılsama olduğu açıktır. Yine açıktır ki bütün bunlar bir sürü sinirsel numara gerektirir. Bağlantıların da önemli olduğu bir o kadar açıktır. Görme sinirlerini kestiğinizde kör olursunuz. Tam tersine kör bir insanda, beyne yerleştirilen bir dizi mikroelektrotla beynin görme merkezleri harekete geçirildiğinde o kör insan doğrudan beynin ürettiği imgeleri görür; gerçi şimdiye kadar yapılan deneylerde sadece ilkel bazı

örüntüler görülmüştür. Yapay görmenin dayanağı budur, henüz emekleme aşamasındadır, ama prensipte uygulanabilir. Aynı sebepten, *The Matrix* filminde olduğu gibi, bütün deneyimlerin bir fiçi içinde deneyimlenmesi de uygulanabilir.

Ne kadar fazla sinirsel numara olduğu, nöroloji yıllıklarında yer alan, çoğumuza boşboğazca “maazallah” dedirtecek yüzlerce tuhaf, acayip ya da insanın tüylerini ürpertecek kadar garip vakayla ortaya konur: Oliver Sacks ve diğerlerinin verimli bir biçimde, hassasiyetle kazdıkları bir madendir bu arşivler. “Karısını şapka sanan adam” herhalde Sacks’ın en meşhur vakasıdır, hatta Michael Nyman bu vakayı bir oda operası olarak uyarlamış, daha sonra filme çekmiştir. Sadece “Dr. P.” olarak tanımlanan sözkonusu adam, “görsel agnozi” denilen bir rahatsızlıktan mustarip seçkin bir müzisyendi; görüşü mükemmeldi, fakat nesneleri, özellikle de yüzleri birbirinden ayırma becerisi acınacak kadar yetersiz hale gelmişti. Sacks’a muayeneye geldiğinde, ayağını ayakkabısı sanmış, sonra da şapkasını almaya çalışırken yanlışlıkla karısının başına uzanmıştı. Beyninde görsel işlemlerden sorumlu bir bölgenin Alzheimer hastalığının olağandışı bir biçimi yüzünden bozulması, adamcağızın görsel dünyasını soyut şekiller, renkler ve hareketler oluşan anlamsız örüntülere indirgemiş, gelişkin zihnine ve muhteşem müzisyenliğineyse dokunmamıştı.

Şükürler olsun ki bu tür bozulmalara ender rastlanır, ama nörolojinin bakış açısıyla yaklaşıldığında, bu olabilecek bozulma türlerinden sadece biridir. Beynin yine sınırlı bir bölgesinin hasar görmesinin neden olduğu bununla ilişkili bir rahatsızlık, Capgras sendromu olarak bilinir. Bu sendromdan mustarip kişi, insanları mükemmel derecede iyi tanıyabilir, ama eşinin ya da ebeveynlerinin göründükleri gibi olmadığı, aslında asıl eşi ve ebeveynlerinin yerini almış sahtekarlar olduğu yolunda tuhaf bir inanca kapılır. Sorun genel olarak insanlarla ilgili değildir, sadece yakın dostlar ve aileyle, duygusal olarak yakın insanlarla ilgilidir. Bu rahatsızlıkta sorun, görsel merkezleri beynin duygusal merkezlerine (örneğin amigdalaya) bağlayan sinirlerdedir.

Bir darbe ya da başka bir lokal yaralanma (örneğin bir tümör) bu bağlantıları kopararak sevilen birini görmeye verilen normal duygusal tepkiyi engeller, bir yalan dedektörü kullanarak tespit edilebilecek bir tepkidir bu. Nörolog Ramachandran'ın esprisini yaptığı gibi, iyi bir Yahudi olmasanız da, annenizi görmek ellerinizin terlemesine neden olur. Ter elin elektirik direncini değiştirir, bu da bir yalan dedektörü tarafından tespit edilir. Ama Capgras sendromundan mustarip insanlar sevdiklerini gördüklerinde elleri terlemez, gözleri onlara gördüklerinin anneleri olduğunu söyler, ama duygusal merkezleri bu izlenimi gerekçelendiremez. Öyle görünüyor ki bu sendromun temelinde bu duygusal boşluk vardır. Beyin, tutarlılıktan yoksun bir şekilde harekete geçerek saçma, ama mantıklı bir kavrayışa, görülen kişinin bir sahtekar olduğu sonucuna varır. Duygular akıldan daha güçlüdür, daha doğrusu, aklın temelidir.

Cotard sendromu daha da tuhaftır. Burada kusur çok daha derindedir: Bütün duyuların beynin duygusal merkezleriyle bağlantısı kesilir, duygusal bir düzlük oluşur. Bütün duyuların algıladığı şeyler duygusal kayıtlara sıfır olarak geçerse tuhaf, ama "mantıksal" sonuç kişinin ölmüş olması gerektirir. Mantık, duygunun yerini almıştır. Cotard sendromundan mustarip bir hasta gerçekten de ölü olduğuna inanır, hatta çürümüş et gibi koktuğunu iddia edebilir. Sorulduğunda, ölümlerin kanamadığı konusunda size katılacaktır, ama iğneyle dürttüğünüzde şaşır-mış görünecek, sonra da ölümlerin gerçekten de kanadığı sonucuna varacaktır.⁴

Devam edebilirim. Beynin belli bölgelerindeki yaralanmalar (lezyonlar) yeniden üretilebilir belli kusurlara yol açar. Pek şaşırtıcı değil, ama aynı bölgedeki bir kusur, farklı insanlarda aynı kusura yol açar, aynı şey hayvanlarda da geçerlidir. Bazı vakalarda bu gibi lezyonlar duygusal işlemleri etkiler, hareket körlüğü gibi rahatsızlıklara yol açar: Bu da tuhaf sendromlardan biridir, kişi hareket eden nesneleri algılayamaz, onun yerine dünyayı disko ışıklarıyla aydınlatılmış gibi görür, hareket eden arabaların hızını tahmin etmesi, hatta bir kadeh şarap doldurması bile

imkansız hale gelir. Başka bazı vakalarda, benzer lezyonlar bilincin kendisini değiştirir. Geçici global amnezi hastaları plan yapamazlar ya da hatırlayamazlar, salt şimdinin bilincindedirler. Anton sendromundan mustarip kişiler kördürler, ama bunu reddederler. Anosognozi hastaları iyi olduklarını söylerler, ama aslında paralize olmuşlardır: “Sadece biraz dinleniyorum, doktor.” Acı asembolisinden mustarip olanlar acı duyarlar, ama acının itici niteliğini yaşamazlar, canları yanmaz, kırılmazlar. Kör görüş hastaları görebildiklerinin bilincinde değillerdir (gerçekten de kördürler) ama yine de sorulduğunda nesneleri gösterebilirler. Bu son örnek, kör görüş, bir nesneyi gördüklerinde (ya da görmediklerinde) cevap vermek üzere eğitilmiş makak maymunlarında kanıtlanmıştır. Hayvanlarda bilinci inceleyen deneysel psikologlar kuşağının dehasıyla şeffaflık kazandırılan birçok paralellikten biri de budur.

Hangi yazar bu gibi kusurların tuhaf niteliğini tahmin edebilir ki? Kurgudan daha tuhafırlar, ama geçen yüzyılda, hatta daha uzun süredir nörologların titiz çalışmaları sonucunda bu kusurların gerçekliği, yeniden üretilebilirliği, nedenleri (beynin belli bir kısmındaki bir lezyon anlamında neden) izlenmiştir. Beynin bazı parçaları elektrotlarla uyarıldığında da aynı derecede tuhaf bağlantısızlıklar ortaya çıkar. En beter koşullarda feci bir bilinç kaybına, kimi zaman *dementia* (hafıza kaybı) ya da kısmi felce neden olan genel nöbetlerle gelen, tedavi edilemez ağır epilepsiden mustarip yüzlerce insanda, geçen elli-altmış yıl içinde bu uygulanmıştır. Epilepsi yüzünden nörocerrahi ameliyatlar geçiren birçok hasta gönüllü (ve tamamıyla bilinçli olarak) denek olmuşlar, hissettiklerini sözlü olarak cerraha aktarmışlardır. Böylece, beynin belli bir bölümünü uyarmanın ezici bir depresyon hissi uyandırdığını, bu hissin uyarı kesilir kesilmez dağıldığını; başka bölgelerin uyarılmasının görüler uyandırdığını ya da zihne müzik parçaları getirdiğini biliyoruz. Bir bölgenin uyarılması, güvenilir bir biçimde beden dışı bir deneyim yaratır, insana ruhu tavana yakın bir yerlerde uçuyormuş gibi gelir.

Daha yakın tarihlerde, benzer amaçlarla sofistike numaralar

uygulanmaya başlandı: Elektromanyetik alanları yönlendirerek beynin belli bölgelerinde cerrahi müdahale olmaksızın elektiriksel değişiklikler yaratan bir başlık, yani bir transkranyal manyetik stimülatör örneğinde olduğu gibi. 1990'ların ortalarında, Kanada'da Laurentian Üniversitesi'nde çalışan Michael Persinger, temporal lobu uyarmaya başlayıp da güvenilir bir biçimde (insanların yüzde 80'inde) mistik görüler, odada Tanrı'nın, hatta şeytanın varlığı hissini uyandırmaya başladığında, bu başlığın adı kötüye çıktı. İsveçli araştırmacılar bulguları sorgulamış olsalar da başlık kaçınılmaz olarak Tanrı başlığı diye bilinir oldu. İngiliz bilimsel belgesel televizyonu *Horizon* 2003 de hoş bir muziplik yaparak ünlü ateist Richard Dawkins'i Kanada'ya Tanrı başlığını denemeye götürdü. Ne yazık ki başlık Dawkins'te aşkın bir deneyim uyandırmadı. Persinger bu başarısızlığı, Dawkins'in temporal lob duyarlılığını ölçen psikolojik ölçekte kötü puan almasıyla açıkladı. Yani Dawkins çoğu zaman halüsinasyon görmüyordu. Ama tanınmış yazar ve deneysel psikolog Susan Blackmore çok etkilenmişti: "Persinger'in laboratuvarına gidip uyguladığı prosedürlerden geçtiğimde, şimdiye kadar yaşadığım en olağanüstü deneyimleri yaşadım... Bunun bir plasebo etkisi olduğu anlaşılırsa şaşırırm doğrusu." Bu arada Persinger, mistik deneyimlerin fiziksel olarak başlatılabilmesinin Tanrı'nın varlığı aleyhine bir argüman olmadığını işaret etme çabasıındaydı; "doğüstü deneyimlerin aktarımı için fiziksel bir mekanizma" olması gerekiyordu.

Vurgulamaya çalıştığım şey şu: Beyin, aynı ölçüde zihin, dikkat çekici bir biçimde uzmanlaşmış bölgelere ayrılmıştır. Bu iç işleyişlerin bilincinde değiliz. Zihni değiştiren, yine hassasiyetle kesin hedefler üzerinde etkili olan ilaçların etkisi böyle bir tablo çizer. Örneğin LSD, psilosibin (mantarlardaki bir bileşen) ve meskalin (ecstasy'nin ana bileşeni) beynin belli bir bölgesinde (korteksin beşinci katmanında) belli nöronlarda (piramitsi nöronlar) bulunan belli tipte bir reseptör (serotonin reseptörleri) üzerinde etkili olur. Pasadena'da Caltech'te çalışan nörolog Christof Koch'un gözlemlediği üzere, bu ilaçlar beynin devre-

lerini bütüncü bir biçimde karıştırmaz. Benzer şekilde, birçok anti-depresan ya da anti-psikotik ilacın da belli hedefleri vardır. Bunun bir anlamı da bilincin beynin genel işleyişinden bir tür “alan” olarak bütüncü bir biçimde doğuyor olmaması, beynin belli bölgelerinin, herhangi bir anda birkaçının işbirliği içinde çalışmasının bir özelliği olmasıdır. Nörologlar arasında bile böyle bir şey üzerinde pek az görüş birliği olduğunu söylemek yerinde olacaktır, ama sonraki sayfalarda bu görüşü gerekçelendirmeye çalışacağım.



Görmenin görüldüğünden daha karmaşık olduğunu, ama kendi kendimizi inceleyerek, nasıl ya da neden gördüğümüz “üzerine düşünerek” bu karmaşıklığı anlayamayacağımızı daha önce belirtmiştim; bir filozofun mantıklı bir biçimde düşünerek de bunu öngöremeyeceğini belirteyim. Bilinçli zihinlerimizin, görmenin temelinde yatan sinirsel mekanizmalara erişimi yoktur. Enformasyonun, kendisini oluşturan parçalara ne ölçüde ayrıldığı, Harvard’da David Hubel ile Torsten Wiesel’in 1950’lerden sonra yürüttüğü, 1981’de (Roger Sperry’yle birlikte) onlara Nobel Ödülü getiren öncü çalışmalar öncesinde pek anlaşılmamıştı. Hubel ve Wiesel, anestezi yapılmış kedilere mikroeletrotlar yerleştirerek, görsel sahnenin farklı yönleriyle farklı nöron gruplarının aktive edildiğini gösterdiler. Her görüntünün, örneğin köşegen, dikey ya da yatay, otuz ya da daha fazla kanala ayrıldığını, dolayısıyla bazı nöronların yalnızca belli bir yönde ilerleyen bir kenar gördüklerinde ateşlendiğini artık biliyoruz. Başka hücreler düşük ya da yüksek kontrast, derinlik, belli bir renk ya da belli bir yönde harekete cevaben ateşlenir. Böyle her özelliğin uzamsal konumu da görsel alanla ilişkili olarak haritalandırılmıştır, öyle ki görsel alanın sol üst köşesindeki koyu renk yatay bir doğru, birkaç nöron grubunun ateşlenmesine neden olur, sağ alt köşedeki benzer bir doğruysa farklı bir nöron grubunu tetikler.

Nihayetinde beyindeki görsel alanlar dünyanın topografik bir haritasını çıkarır. Ama bu harita ancak sonradan bir anlam ka-

zanır, zavallı Dr. P'nin yakalayamadığı türden bir anlam. Görsel enformasyonun böyle bir anlam (Aha! Bu bir kaplan!) edinebilmesi için, kesinlikle birkaç aşamada yeniden birbirine bağlanması gerekir; doğrular ve renklerin bağlanmasıyla şeritler, çömelmiş bir şeklin anahatları ve nihayetinde tam bir tanıma: Çalıların ardında bir kaplan. Bu sürecin ancak son aşamaları bilinçli bir temsil kazanır, görsel işlemlerin çok büyük bir bölümü zihnin ışığını hiç göremez.

Bir sahnenin bütün bu dağınık parçaları nasıl yeniden birbirine bağlanıyor da tutarlı bir görüntü oluşturuyor? Bu soru hâlâ nörolojinin en ilginç sorularından biri, henüz hiç kimseyi tatmin edecek bir şekilde cevaplanamamış bir soru. Ama kapsamlı olarak özetlediğimizde, cevap nöronların eşzamanlı olarak ateşlendiğidir: Birlikte ateşlenen nöronlar birlikte bağlanır. Dakik zamanlama esastır. 1980'lerin sonunda Frankfurt'ta Max Planck Beyin Araştırma Enstitüsü'nde çalışan Wolf Singer ile meslektaşları, bugün gama salınımları olarak bilinen, bir EEG'yle (elektroensefalogram) yakalanabilen yeni bir tip beyin dalgasının varlığını ilk kez bildirmişlerdi.⁵ Büyük nöron gruplarının ortak bir örüntüyle senkronize olabildiğini, her 25 milisaniyede bir, yani saniyede yaklaşık 40 kere ateşlendiklerini bulmuşlardı (40 Hz). (Aslında yaklaşık 30 Hz ile 70 Hz arasında bir yelpaze vardır, önemlidir, buna daha sonra döneceğiz.)

Bu gibi senkronize ateşlenme örüntüleri tam da Francis Crick'in aradığı şeydi. Crick, DNA şifresinin çözülmesi konusunda kazandığı başarının ardından, sağlam zihnini bilinç sorununa çevirmişti. Christof Koch'la birlikte çalışıyor, bilincin kendisiyle korelasyon gösterebilecek bir tür ateşlenme örüntüsü, kendi deyişiyle "bilincin nöral bağıntıları"nı araştırıyordu.

Crick ve Koch, görsel olarak işlenen şeylerin büyük bölümünün bilinç dışı kaldığını gayet iyi biliyordu. Bu da bilinç sorununu daha ilginç hale getiriyordu. Beynin bütün duyuşal girdisi nöronların ateşlenmesi biçiminde gelir, ama bazı nöron ateşleme tipleri bilinçli olarak algılanır, böylece bir rengin ya da bir yüzün farkına varırız, oysa bazı ateşleme tipleri (doğrular, kontrast,

mesafe vs. bütün bunların bilinçdışı olarak görsel işlenmesi) bilinçli olarak algılanmaz. Aradaki fark nedir?

Crick ve Koch, hangi nöron tiplerinin bilinçli bir algıyla ilişkili olduğunu, hangilerinin olmadığını bile bilmiyorsak, aradaki farkı söylemenin bir yolu olmadığı şeklinde akıl yürütüyorlardı. Bulmak istedikleri şey, özne bir şeyin bilincine vardığı anda (örneğin bir köpek gördüğünde) ateşlemeye başlayan, dikkat başka bir yere çevrilir çevrilmez sönen belli bir nöron grubuydu. Crick ve Koch muhtemelen, nöronların ateşlenmesinde aslında bilinçli algılar doğuran farklı bir şey olması gerektiğini ileri sürüyorlardı. Bilincin nöral bağlantılarını arayış, bir tür nörolojik Kutsal Kase arayışına döndü. 40 Hz'deki salınımlar hayal güçlerini çekmişti, çünkü kavramsal bir cevap sunuyorlardı (hâlâ sunarlar). Birlikte ateşlenen nöronlar herhangi bir anda beynin büyük geniş alanları üzerinde birlikte bağlanıyorlardı. Bütün paralel devreler, zamanın kendisiyle bir seri üretime indirgeniyordu. Böylece bilinç tıpkı bir orkestranın enstrümanları gibi anbean değişiyor, farklı melodiler herhangi bir anda uyum içinde birbirleriyle bağlanıyordu. T. S. Eliot'ın deyişiyle, müzik sürerken müziksiz.

Bu fikir ayartıcıdır, ama üzerine düşündüğünüzde çok geçmeden daha karmaşık bir hal alır. Temel sorun şudur ki bağlanmanın sadece görsel sistemde değil, birçok düzeyde gerçekleşmesi gerekir. Zihnin başka yönleri de büyük ölçüde aynı şekilde çalışıyormuş gibi görünmektedir. Örneğin, hafızayı ele alalım. Nörokimyager Steven Rose, güzel kitabı *The Making of Memory*'de hatıraların beynin tamamına duman gibi yayılma biçimi karşısında nasıl hayrete kapıldığını hatırlar, hatıralar belli bir yerde "bulunuyormuş" gibi görünmemektedirler. Rose daha sonra, hatıralar tıpkı görme gibi, onları oluşturan parçalara ayrıldığı için durumun böyle olduğunu keşfetmişti. Örneğin, tatlandırılmış boncukları gagalayan yeni doğmuş civcivleri inceleyen Rose, civcivlerin kısa süre sonra tadı acı olan renkli boncuklardan kaçınmayı öğrendiğini görmüştü, ama bu boncukların hatırası parçalar halinde saklanıyordu, renk bir yerde, şekil bir yerde, boyut, koku ya da acı tat başka bir yerde vs. Tutarlı bir anı oluşturmak,

bütün bu unsurların yeniden bağlanmasını gerektirir, bu da simüle edilmiş bir yeniden oynatmaya denk düşer. Son dönemde yapılan araştırmalar da hatıranın bileşenlerinin yeniden bağlanmasının, ilk başta deneyime cevap veren tam olarak aynı nöron topluluğunun ateşlenmesine bağlı olduğunu göstermiştir.

Nörolog Antonio Damasio daha da ileri giderek, “benliği” daha sinirsel haritalara yerleştirir. Damasio duygular ile hisler arasında titiz (bazıları çok titiz olduğunu söyler) bir ayırım yapar. Damasio’ya göre bir duygu daha çok fiziksel bir bedensel deneyimdir; bağırsakların korkuyla burulması, kalbin hızlı hızlı çarpması, avuçların terlemesi, gözlerin açılması, gözbebeklerinin küçülmesi, dudakların büzüşmesi vs. Bunlar bilinçdışı davranışlardır, büyük ölçüde bizim kontrolümüz, hatta hayal etme becerimiz dışındadırlar, en azından rahat bir kent hayatı sürenlerimiz açısından. Onca yıllık tırmanışlarım içinde sadece iki ya da üç kez hayvani bir korkuya kapıldım; bağırsaklarımı buran, yoğunluğuyla beni sarsan bir duygusal tepkiydi. Kendi korkumu sadece bir kez kokladım, ama kokusunu unutamam: Rahatsız ediciydi. Damasio’ya göre, bütün duygular, en kademeli duygular bile fizikseldir, bedende yerleşiktir. Ama beden zihinden ayrı değildir. Zihne bağlıdır. Bütün bu bedensel haller sinirler ve hormonlar yoluyla beyne bildirim gönderir, bedenin halindeki değişikliğin parça parça, organ organ, sistem sistem haritası çıkarılır. Bu haritalandırmanın büyük bölümü beyin kökü ve orta beyin de dahil olmak üzere beynin daha eski kısımlarında, bütün omurgalıların beyinlerinde sadakatle korunan merkezlerde gerçekleşir. Bu zihin haritaları hisleri oluşturur, yani bedensel duyguların sinirsel haritalarını. Bu gibi sinirsel haritaların (esasen bilginin) öznel bir hissi nasıl doğurduğu, kısa bir süre sonra tekrar döneceğimiz tartışmalı bir konudur.

Ama hisler bile Damasio için yeterli değildir. Kendi hislerimizi hissetmeye başlayınca, hissimizi bilinceye kadar bilinçli değilizdir. Bu da elbette ki daha fazla harita demektir. Böylece ilk sinirsel haritalar her anının haritasını tekrar tekrar kaydederek bedensel sistemlerimizin haritasını çıkarır: kaslarımızın hali,

mide asidi, kan şekeri, nefes hızı, göz hareketleri, nabız, mesane şişmesi vs. Nabız, değişiklik yok; kandaki oksijen, değişiklik yok; nihayet sonunda “Aman Tanrım işte geliyor!” diye kayıt tuttuklarını hayal edebiliyorum. Nabız hızlanır. Damasio benlik hissimizin, başta bilinçdışı bir protobenlik, esasen bedensel durumun bütünlüklü bir okuması olarak bütün bu bedensel raporlardan doğduğu görüşündedir. Gerçek özbilinç, bütün bu zihinsel haritaların dış dünyadaki “nesneler”le ilişkili olarak değişme biçiminden doğar: oğlunuz, şu kız, baş döndürücü bir uçurum, kahve kokusu, biletçi vs. gibi nesneler. Bütün bu nesneler doğrudan duyularla algılanır, ama aynı zamanda bedende de duygusal bir cevap uyandırır, beyindeki sinirsel beden haritaları bu cevabı alarak bir his doğururlar. O halde bilinç, dünyadaki nesnelerin benliği nasıl değiştirdiğinin bilgisidir: bütün bu haritaların ve nasıl değiştiklerinin bilgisi, başka bir deyişle ikinci dereceden bir harita. Hislerin dünyayla nasıl ilişkilendiğinin haritası. Algımızı değerlere bürüyen bir harita.



Peki bu haritalar nasıl oluşur? Birbirleriyle nasıl ilişkili hale gelirler? En ikna edici bulduğum cevap, immünolojiye yaptığı katkılardan ötürü 1972’de Nobel Ödülü kazandıktan sonra, meslek hayatının sonraki yıllarını bilinç üzerine çalışmaya adanmış nörolog Gerald Edelman’dan geliyor. Edelman’ın fikirleri, ıpkı immünoloji üzerine yaptığı çalışmalar gibi, aynı kaynaktan beslenir: beden içinde seçilimin gücünden. Edelman, immünoloji alanında, tek bir antikorun bir bakteriyle temasından sonra seçici olarak güçlenebileceğinin gösterilmesine katkıda bulunmuştu: Seçilim, kazanan bağışıklık hücrelerinin diğerleri aleyhine yayılmasına yol açar. Bir ömür süresinin yarısından sonra, kan dolaşımınızdaki bağışıklık hücrelerinin özelliği doğrudan genlerinize değil, büyük ölçüde deneyimlerinize dayanır. Edelman’a göre, benzer tipte bir seçilim beyinde sürekli işler. Burada bazı nöron grupları kullanım yoluyla seçilir ve güçlendirilir, diğer nöron grupları da kullanılmadıkları için kaybolup gider. Yine kazanan

bileşim hakim olur. Ve yine nöronlar arasındaki ilişkiler biriktirilen deneyimlerle belirlenir, doğrudan genlerle belirlenmez.

Olaylar şöyle gelişir: Embriyonik gelişme sırasında beyin “külçe” halinde, kabaca yontulmuş bir biçimde bağlantılanmıştır: Sinir demetleri beynin farklı bölgelerine (optik sinirler görme merkezleriyle, *korpus kallosum* beynin iki yarı küresiyle vs.) bağlanır, ama özellik ya da anlam biçiminde pek az bağlantı kurulur. Esas itibarıyla, genler beynin genel devrelerini belirler, deneyimse tam bağlantıları ve bunun getirdiği kendine özgü bütün ayrıntıları belirler. Anlam çoğunlukla, doğrudan beyne yazılmış deneyimle birlikte gelir. Edelman’ın deyişiyle, “Birlikte ateşlenen nöronlar birlikte bağlanırlar”. Başka bir deyişle, aynı anda ateşlenen nöronlar bağlantılarını (sinapslarını) güçlendiriyor ve onları fiziksel olarak bağlayan daha fazla bağlantı oluşturmuyorlardı.⁶ Bu gibi bağlantılar lokal olarak nöron grupları içinde oluşur (örneğin, görsel enformasyonun farklı yönlerinin birbirine bağlanmasına yardımcı olur), ama büyük mesafeler arasında da kurularak görsel merkezleri duygusal merkezlere ya da konuşma merkezlerine bağlarlar. Aynı zamanda, diğer sinaptik bağlantılar nöronlarının pek az ortak yönü olduğu için zayıflar ya da tüümüyle ortadan kaybolurlar. Doğumdan hemen sonra, deneyimlerin akışı hız kazanırken, zihin de içerden yapılandırılır. Milyarlarca nöron ölür, hayatın ilk aylarında bütün nöronların yüzde 20 ile yüzde 50’si kaybolur, milyarlarca zayıf sinaptik bağlantı da kaybolur. Aynı zamanda trilyonlarca sinaptik bağlantı güçlenir, korteksin bazı bölgelerinde nöron başına 10.000 sinaps oluşur. Bu sinaptik esneklik yetiştirme çağımızda daha güçlüdür, ama ömrümüz boyunca devam eder. Montaigne bir keresinde, 40 yaşın üstündeki her insanın kendi yüzünden sorumlu olduğunu söylemişti. Hiç kuşku yok ki kendi beynimizden de sorumluyuz.

Genlerin bu sürece tam olarak nasıl katkıda bulunduğunu merak ediyor olabilirsiniz. Sadece genel mimariyi değil, beynin farklı bölgelerinin göreceli büyüklüğünü ve gelişimini de belirleyerek katkıda bulunurlar. Nöronların hayatta kalma olasılığını, sinaptik bağlantılarının gücünü, heyecana meyilli nöronların

engellemeye yatkın nöronlara onanını, farklı sinir ileticilerinin (sinirler arasındaki kimyasal ileticilerin) genel dengesini etkilerler. Bu gibi etkiler açıktır ki kişiliğimize katkıda bulunur, aynı zamanda tehlikeli sporlara, uyuşturuculara, depresyona girmeye, yağmurda dans etmeye, akılcı düşünmeye bağımlı olma yatkınlığımızı belirler, genler bu şekilde yetenekleri ve deneyimleri de etkiler. Ama genler beynin ayrıntılı nöral mimarisini belirlemez. Nasıl belirleyebilirler ki? 30.000 genin serebral korteksteki 240 trilyon (trilyon= 10^{12}) sinapsı (Koch'un verdiği rakamdır) belirlemesi hiçbir şekilde mümkün değildir. Bu hesaba göre her genin 8 milyar sinapsı belirlemesi gerekir.

Edelman beynin gelişim sürecinden *nöral Darwincilik* olarak bahseder, bu tabir deneyimin başarılı nöral bileşimleri seçtiğini vurgulamaktadır. Doğal seçilimin bütün temel dayanakları mevcuttur: Muazzam bir nöron popülasyonu yola çıkarız, bunlar aynı amaçlara ulaşmak üzere milyonlarca farklı biçimde bağlanır. Nöronlar kendi aralarında farklılık gösterir, büyüyüp güçlenebilecekleri gibi sönüp gidebilirler de; nöronlar sinaptik bağlantı oluşturma yarışındadır, başarılarına bağlı olarak da farklı oranlarda hayatta kalırlar: “En uygun” nöron bileşimleri en geniş sinaptik bağlantıları kurar. Francis Crick bir keresinde bütün bu yapıya “nöral edelmanizm” denmesinin daha iyi olacağını söyleyerek takılmıştı, çünkü paralellikler biraz zorlanmıştır. Yine de bu temel fikir, nörologlar arasında bugün yaygın bir kabul görmektedir.

Edelman bilincin nöral temellerine ikinci bir önemli katkıda da bulunmuştu: nöral devrelerin yankılanması fikri ya da Edelman'ın (pek de yardımcı olmayan) tabiriyle, paralel eş-girişli sinyaller. Demek istediği şudur: Bir bölgede ateşlenen nöronlar uzak bölgelerdeki nöronlarla bağlanırlar, uzak bölgelerdeki nöronlar başka bağlantılarla karşılık vererek geçici bir nöral devre oluşturur, bu nöral devre eşzamanlı olarak yankılanır, ta ki rakip duyuşal girdiler nöron topluluğunu dağıtıp yerine yine birlikte yankılanan başka bir geçici topluluk geçirinceye kadar. Burada Edelman'ın fikirleri Crick, Koch ve Wolf Singer'ın fikirleriyle ga-

yet güzel harmanlanır. (Gerçi bu ortak noktaları takdir edebilmek için satır aralarının okunması gerektiğini belirtmek gerek; başkahramanların birbirine bu kadar az atıfta bulunduğu, hatta karşıtlarının yanlış yönlendirici fikirlerini kınamak için bu kadar ender saldırıya geçtiği başka bir alana rastlamadım desem yeridir.)

Bilinç, onlarca milisaniye ile yüzlerce milisaniye arasında değişen bir ölçekte işler.⁷ İki imgeyi aralarında 40 milisaniye ile bir anlığına gösterin, sadece ikinci görüntünün bilinçli olarak farkında olursunuz, ilk imgeyi görmezsiniz bile. Ama mikroelektrotlar ve beyin taramaları (örneğin işlevsel manyetik rezonans) beynin görsel merkezlerinin ilk imgeyi aldığını gösterir, sadece beyin bunun hiç bilincine varmamıştır. Ben bunun bilinçaltı reklamların temeli olduğunu sanıyordum, hani bir filmde mesela Coca Cola reklamı yapan tek bir sahne belirir, reklam bilinçli olarak algılanmaz, ama yine de hemen sonra akla gelebilir, bilince düşebilir. Ne yazık ki Christof Koch beni bunun bir şehir efsanesi olduğuna ikna etti. Öyle görünüyor ki bir nöral topluluğun bilinç kazanabilmesi için onlarca, hatta yüzlerce milisaniye birlikte yankılanmaları gerekiyor; burada yine Singer'ın 40 Hz'lik salınımlarına geliyoruz. Singer da Edelman da beynin farklı bölgelerinin bu şekilde gerçekten de eşzamanlı salındığını göstermiştir, bölgeler birlikte "faz kilitlenmesi"ne girer. Başka nöron grupları farklı fazlarda biraz daha hızlı ya da biraz daha yavaş birlikte kilitlenir. Prensip, bu gibi faz kilitlenmeleri aynı sahnenin farklı yönleri arasında ayırma gidilmesini mümkün kılar. Dolayısıyla, yeşil bir arabanın bütün unsurları birlikte faz kilitlenmesine girer, yakındaki mavi bir arabanın unsurlarıysa biraz daha farklı bir faz kilitlenmesine girerler ve bu da iki arabanın zihinde karışmamasını sağlar. Görsel bir sahnenin her unsuru birbirinden biraz farklı bir biçimde faz kilitlenmesine girer.

Singer'ın faz kilitlenmesine girmiş bütün bu salınımların daha yüksek bir düzeyde, bilinç düzeyinde nasıl birbirine bağlandığını açıklayan güzel bir fikri vardır. Yani bütün bu salınımların başka duyuşal girdilerle (işitme, koku alma, tat alma vs.) ve hisler, hafıza ve dille nasıl bağlanıp bütünleşmiş bir bilinç hissi ya-

rattığını açıklayan bir fikir. O bu fikre *nöral el sıkışma* der, nöral el sıkışma enformasyonun hiyerarşik olarak “yuva bulması”nı, böylece daha küçük enformasyon parçalarının büyük tabloda yerlerini bulmasını sağlar. Sadece, hiyerarşide bütün bilinçdışı enformasyonun bir tür işletim özetine denk gelen en tepe nokta bilinçli olarak algılanır.

Nöral el sıkışma basit bir olguya dayanır: Bir nöron ateşlediğinde depolarize olur, yeniden polarize oluncaya kadar bir daha ateşleyemez. Bu da biraz zaman alır. Ayrıca nadasa yatılan repolarizasyon sürecinde yeni bir sinyal ulaşırsa, bu sinyal görmezden gelinecektir. Şöyle düşünelim: Bir nöron saniyede 60 kez ateşliyorsa (60 Hz), sadece faz senkronizasyonu içinde ateşlenen başka nöronlardan sinyaller almakla sınırlanmıştır. Örneğin, ikinci bir nöron grubu saniyede 70 kez ateşliyorsa (70 Hz), çoğu kez ilk gruplar senkronize olmayacaktır. Bu gruplar, el sıkışmaları mümkün olmayan bağımsız birimler haline geleceklerdir. Öte yandan, üçüncü bir nöron grubu daha yavaş, diyelim ki saniyede 40 Hz ile ateşliyorsa, bu nöronların yeniden polarize olup ateşlemeye hazır hale gelmesi için daha uzun bir süre geçer, sadece doğru tetikleyici beklenir. Bu gibi nöronlar 70 Hz’de salınan nöronlara cevaben ateşlenebilir. Başka bir deyişle, salınım ne kadar yavaş olursa, faz örtüşmesi o kadar büyük, farklı nöron gruplarının el sıkışması ihtimali o kadar fazla olur. Dolayısıyla, en hızlı salınımlar görsel sahnelerin, kokuların, hatıraların, duyguların vs. farklı yönleriyle bağlanır, her biri bağımsız birimler haline gelir, daha yavaş salınımlarsa bütün duyusal ve bedensel enformasyonla bağlanarak birleşik bir bütün meydana getirir; bu Damasio’nun ikinci dereceden haritasıdır, bilincin akışında bir andır.

Bütün bunların pek az bir bölümü kuşkuya yer bırakmayacak şekilde kanıtlanmıştır, ama burada resmettiğim tabloyla en azından tutarlılık gösteren bol miktarda kanıt vardır. En önemlisi, bu fikirler sınanabilir tahminler oluşturur; örneğin 40 Hz’lik salınımların bilincin içeriğini bağlamak için gerekli olduğu, oysa tersine bu gibi salınımların kaybedilmesinin bilincin içeriğinde bir kayba denk düştüğü öngörüsünde bulunurlar. Bu

gibi ölçümleri yapmanın zorluğu dikkate alınır (bu ölçümler beyinde binlerce nöronun eşzamanlı olarak ateşleme hızlarının ölçülmesini gerektirir), bu varsayımların ya da başkalarının doğrulanmasına daha yıllar olabilir.

Böyle bile olsa, açıklayıcı bir çerçeve olarak bu kavramlar bilincin anlaşılabilir olmasını mümkün kılıyor. Örneğin, genişlemiş bilincin nasıl olup da çekirdek bilinçten gelişebileceğini gösteriyor. Çekirdek bilinç şimdide işler, kendisini anbean yeniden inşa eder, beyin dışsal nesnelerle nasıl değiştiğinin haritasını çıkarır, algıları hislere bürür. Genişlemiş bilinç de aynı mekanizmaları kullanır, ama hatıralar ve dili çekirdek bilincin her anına bağlar, duygusal anlamı otobiyografik bir geçmişle niteler, hisleri ve nesneleri kelimelerle etiketler vs. Dolayısıyla, genişlemiş bilinç duygusal anlamın üzerine kurulur, hafıza, dil, geçmiş ve geleceği çekirdek bilincin şimdisiyle bütünleştirir. Aynı nöral el sıkışma mekanizmaları, geniş bir paralel devrenin algının tek bir anıyla bağlanmasını mümkün kılar.

Bütün bunları inandırıcı buluyorum. Ne var ki en derin soru cevaplanmadan kalıyor. Nöronlar nasıl olur da his üretir? Bilinç, bir hissi hissetme becerisi, farklı duygusal anlamlar üretme becerisi, benliğin dünyadaki yeri üzerine akıp giden bir yorumsa, bütün bu eser, hislerin parmak ucunda dans ediyor demektir: filozofların öznel hisler dediği problem yani. Zor problemle doğrudan yüzleşmenin vakti geldi.



Acının can yakmasının bir sebebi vardır. Pek az talihsiz insan, acıya doğuştan duyarsız dünyaya gelmiştir. Korkunç, genellikle de beklenmedik rahatsızlıklardan mustarıptırlar. Gabby Gingras adında dört yaşında bir kız çocuğu, Melody Gilbert'ın 2005'te yönettiği bir belgesele konu olmuştu. Acı olmazsa, gelişim sürecindeki her köşetaşı bir sorun haline gelir. İlk süt dişleri çıktığında, Gabby parmaklarını kemiklerine varıncaya dek çiğnemiş, o kadar fena yaralamıştı ki annesi ve babası dişlerini aldırarak zorunda kalmıştı. Yürümeyi öğrenirken, Gabby kendi kendisi-

ni tekrar tekrar yaraladı, bir keresinde hiç farkında olmaksızın çenesini kırdı, geçirdiği enfeksiyon ateşlenmesine neden olunca başına ne geldiği anlaşıldı. Altı hafta boyunca damar içine verilen antibiyotiklerle hastanede tedavi gördü. Daha da beteri, parmağını gözüne sokup dikiş atılmasını gerektiren yaralanmalara sebep oluyor, çok geçmeden dikişleri de parçalıyordu. Annesi ve babası elini bağlamayı, sonra da koruyucu gözlük takmayı denedi, ama hiçbir faydası olmadı. Dört yaşındayken, sol gözünün kaldırılması gerekti, sağ gözü de ciddi hasar görmüş, hukuken kör olmuştu (görüşü 20/200'dü). Bu satırları yazdığım sırada, Gabby yedi yaşında, rahatsızlığına uyum sağlamaya çalışıyor. Onun gibi başkaları daha çocukken ölüyor, pek azı hayatta kalıp yetişkinliğe ulaşıyor, ama genellikle ciddi yaralanmalarla yaşamak zorunda kalıyorlar. Gabby'nin ebeveynleri bu rahatsızlıktan mustarip insanları (şimdilik 39 üyesi var) desteklemek üzere bir vakıf kurdular: Gift of Pain (Acı Lütü). Güzel bir isim: Acının bir lütuf olduğu su götürmez.

Sadece acı da değil. Açlık, susuzluk, korku, şehvet, bütün bunlar seçkin Avustralyalı biyolog Derek Danton'ın "ilksel duygular" dediği şeyler arasında yer alıyor: Hepsinin de organizmanın hayatta kalması ya da çoğalması için şekillendiği açık. İnsanlar, üremek için olduğunu bile bile seks yapma konusunda bütün türler içinde yalnız olabilirler; ama antik Yunanlarda bile seks ile üreme arasında doğrudan bir bağlantı olmadığı söylenir, kadınların şiddetle akan dereler ya da rüzgarla "döllendiği"ne inanılırdı. Hayvanlar orgazm ödülü için çiftleşir, yavrular için değil. Tabiat Ana, herhalde Kilise dışında hepimizin gözlerini bağlamıştır. Ama mesele şudur ki bütün bu ilksel duygular hislerdir ve hepsi de biyolojik bir amaca hizmet eder. Acı her şeyden önce nahoş bir histir, acının insanı kıvrandıran acısı olmasaydı kendimizi korkunç biçimde yaralardık; itici niteliği olmaksızın acıyı deneyimlemenin bir yararı yoktur. Aynı şekilde şehveti de: Mekanik çiftleşme kendi başına bir ödül değildir: Biz bütün hayvanlar, etin ödülleri ararız, hissini ararız. Ve yine, çölde nöral bir devre üzerine susuzluğun kaydedilmesi yeterli değildir: Ha-

yatta kalmamıza yardım eden şey, zihni içten içe kemiren, bizi bir vahaya sürükleyen, son bir tahammül zerresini çekip çıkaran o şiddetli duygudur.

Bu gibi ilksel duyguların doğal seçilimle evrildiği fikri pek meydan okuyucu bir fikir değildir, ama bu fikrin, modern psikolojinin babası Amerikalı dahi William James'in ilk kez Victoria döneminin sonlarında işaret ettiği önemli anlamları vardır. James hislerin, dolayısıyla bilincin kendisinin biyolojik bir yararı olduğunu savunuyordu. Bu da bilincin organizmaya bir gölge gibi eşlik eden, ama kendi başına fiziksel etki uyandıramayan "ikincil bir olgu" olmadığı anlamına gelir. Hisler, fiziksel etkiler uyandırır. Eğer fiziksel etkiler uyandırıyorlarsa, o halde bir anlamda fiziksel *olmaları* gerekir. James fiziksellik dışı görünmelerine rağmen, hislerin aslında fiziksel olduğu, doğal seçilimle evrildiği sonucuna varmıştı. Peki ama hisler fiilen nedir? Kimse bu soruya James kadar fazla kafa yormamıştır, onun vardığı sonuç da sezgilere ters ve sıkıntı vericidir. James, maddenin bilinmeyen özellikleri olması, evrene nüfuz etmiş bir tür "zihin tozu" olması gerektiğini savunuyordu. James bugün birçok seçkin nörologun kahramanı olsa da, bir tür pan-psişizme (bilincin her yerde, her şeyin parçası olduğu düşüncesine) sarılıyordu ve pek az kişi böyle bir fikrin peşinden gitmeye meyilliydi. Ta ki şimdiye kadar.

Bu problemin ne kadar zor olduğunu kavramak için televizyon, faks makinesi ya da telefon gibi bazı teknoloji harikalarını düşünelim. Bunların fizik kanunlarını ihlal etmediklerini söyleyebilmek için nasıl işlediklerini bilmeniz gerekmez. Elektronik sinyaller, çıktıları şu ya da bu biçimde şifreler, ama çıktı her zaman fizikseldir: Çıktı bir TV'de ışık örüntüleri, telefon ya da radyo örneğinde ses dalgaları, faks makinesinde baskıdır. Elektronik bir şifre, bilinen bir fiziksel ortamda bir çıktı yaratır. Peki ya hisler? Bu örnekte, sinirler, esasen tıpkı bir TV'nin yaptığı gibi şifrelenmiş elektronik sinyalleri aktarır, nöronlar bir tür şifreyle çıktıyı kesin olarak belirler. Burada bir sorun yok. Peki ama çıktı tam olarak nedir? Maddenin bilinen bütün özelliklerini düşünün. Hisler, elektromanyetik ışıınım ya da ses dalgalarıymış gibi

görünmüyor ya da atomların bilinen fiziksel yapılarındaki bir şeye tekabül etmiyorlar. Kuark degiller, elektron degiller, peki ama ne bunlar? Titreşen sicimler mi? Kuantum gravitonları mı? Karanlık madde mi?⁸

Chalmers'ın dile getirdiği “zor problem” budur işte; kendisinden önce gelen James gibi Chalmers da bu sorunun ancak maddenin yeni temel özelliklerinin keşfedilmesiyle çözülebileceğini savunmuştur. Sebebi basittir. Hisler fizikseldir, ama bilinen, bize dünyanın eksiksiz bir anlatısını sunduğu varsayılan fizik kanunlarında hislere hiç yer yoktur. Doğal seçim, bütün muhteşem kuvvetine karşın, hiçbir şeyden bir şey ortaya çıkaramaz: Üzerinde etkili olabileceği bir şeyin nüvesinin olması gerekir, evrimin şekillendirip zihnin görkemi haline getirebileceği bir his nüvesinin olması gerekir. İskoç fiziksel kimyager Graham Cairns-Smith'in, modern fiziğin “bodrum katındaki bomba” dediği şey budur. Cairn-Smith, hisler maddenin bilinen özelliklerine tekabül etmiyorsa, maddenin kendisinin, seçim sayesinde örgütlenerek nihayetinde iç hislerimizi doğuracak bazı ek özellikleri, “öznel bazı özellikleri” olması gerektiğini söyler. Madde bir şekilde bilinçlidir, fizikçilerin ölçebileceği bildik dışsal özelliklerinin yanı sıra, “iç” özellikleri vardır. Pan-psişizm yeniden ciddiye alınıyor.

Kulağa akıl almaz geliyor. Ama maddenin doğasına dair bilinebilecek her şeyi bildiğimizi düşünmek ne kadar da büyük bir küstahlık! Tabii ki bilmiyoruz. Kuantum mekanığının nasıl işlediğini bile anlamıyoruz. Sicim kuramı, maddenin özelliklerini, tahayyül edilemez on bir boyuttaki tahayyül edilemez derecede küçük sicimlerin titreşimlerinden çıkarması açısından görkemlidir, ama bu kuramda bir nebze olsun hakikat payı bulunup bulunmadığını deneysel olarak belirlemenin hiçbir yolu yoktur. İşte bu yüzden, bu bölümün başında Papa'nın konumunun mantıksız olmadığını belirttim, maddenin derin doğası hakkında, nöronların kaba maddeyi öznel hislere nasıl dönüştürdüğünü bilebilecek kadar fazla şey bilmiyoruz. Elektronlar aynı anda hem parçacık hem dalga olabiliyorlarsa, neden ruh ve cisim de aynı şeyin iki ayrı veçhesi olmasın?

Cairns-Smith daha çok hayatın kökeni üzerine yaptığı çalışmalarla tanınır, ama emekliliğinden bu yana güzel zihnini bilinç problemine yöneltmiş bulunuyor. Kendisinin bu konudaki kitapları nüfuz edici ve eğlencelidir, Roger Penrose ve Stuart Hameroff gibileri zihnin kuantum bahçelerinde izler. Cairns-Smith hisleri tutarlı protein titreşimleri olarak görür, yani bir lazer huzmesinin tutarlı olması anlamında tutarlı; başka bir deyişle, titreşimlerin (fononların) aynı kuantum halinde birleşmesi itibarıyla. Bu, artık beynin geniş alanlarına yayılmış bir “makro-kuantum” halidir. Cairns-Smith yine bir orkestra benzetmesine başvurur, tek tek enstrümanların titreşimlerinin birleşip aşkın armoniler oluşturduğu bir orkestradır bu. Hisler müziktir, bizler de müzik sürerken müzîğiz. Benim yakınlık duyduğum, güzel bir kavrayıştır bu. Evrime kuantum etkileri atfetmek de mantıksız değildir, seçilimin kör kuvvetinin kuantum mekanizmalarını pekala kullanmış olabileceği en az iki örnek biliyorum: ışık enerjisinin fotosentez sırasında klorofile geçişi ve hücre sel soluma sırasında elektronların oksijene tünellenmesi.

Ama zihin söz konusu olduğunda pek aklım yatmıyor. Kuantum zihni mevcut olabilir (keşke olsaydı bile diyebilirim), ama bir arada alındıklarında bana aşılılamazmış gibi görünen birkaç sorun var.

İlki ve en önemlisi lojistik sorun. Örneğin, kuantum titreşimleri sinapslar arasında nasıl sıçrayabilir? Penrose’un kendisinin de teslim ettiği üzere, tek tek nöronların içleriyle sınırlı bir makro-kuantum hali hiçbir şeyi çözmez; kuantum düzeyinde bir sinaps bir okyanus demektir. Fononların uyum içinde titreşebilmesi için birbirlerine çok yakın duran, tekrarlanan protein dizileri olması gerekir, öyle ki fononlar bozunmadan önce her biri diğerleriyle birlikte titreşebilmelidir. Bu gibi sorular deneysel olarak çözülebilir, ama henüz zihinde tutarlı makro-kuantum halleri bulunduğuna dair bir nebze olsun kanıt yoktur. Tam tersine: Beyin sıcak, nemli ve çalkantılı bir sistemdir, bir makro-kuantum halinin üretilebileceği en berbat yerlerden biridir.

Bu alana yaptığım tek şahsi akın çerçevesinde, bu meseleyle

ilgili bir soru sormuştum: Amaçlı kuantum titreşimleri gerçekten varsa ve tekrarlanan protein dizilerine bağlıysa, bu protein dizileri nörodejeneratif hastalıklarla bozulduğunda bilince ne olur? Penrose ve Hameroff bilinci nöronların içindeki mikrotüp-lerle ilişkilendirir, ama bunlar Alzheimer hastalığında bozulur, hastalığın klasik işaretlerinden biri olan dolaşıklıkları oluşturur. Bu gibi dolaşıklıkların binlercesine hastalığın ilk dönemlerinde (çoğunlukla beynin yeni hatıralar oluşturmaktan sorumlu bölümlerinde) rastlanabilir, ama bilinçli farkındalık hastalığın son aşamalarına kadar bozulmadan kalır. Kısacası, mikrotüplerin dolaşıklığıyla bilinçlilik arasında bir korelasyon yoktur. Varsayılan diğer kuantum yapıları için de büyük ölçüde aynı şey geçerlidir. Örneğin, beyaz maddedeki nöronları çevreleyen miyelin kılıflar, multiple sklerozda soyulur, bunun da bilinç üzerinde yok denecek kadar az etkisi olur. Bir kuantum açıklamasıyla en azından tutarlılık gösteren, bulabildiğim tek örnek, astrosit denilen destek hücrelerinin, bir darbe sonrasındaki davranışdır. Bu konuda yapılan bir araştırmada, birkaç hastanın aldıkları bir darbe sonrasında kendi iyileşmelerinin bilinçli olarak farkında olmadığı, ölçülen performanslarıyla kendilerinin bu performansla ilişkin algıları arasında tuhaf bir uçurum olduğu görülmüştü; bu durum astrosit ağında (tabii böyle bir ağ varsa, şimdi biraz kuşkulu görünüyor ya) kuantum tutarlılığı üzerinden açıklanabilir (açıklanamayabilir de).

Kuantum bilinciyle ilgili ikinci bir soru da, aslında bu kavramın, bir şey çözüyorsa ne çözdüğüyle ilgilidir. Diyelim ki beyinde gerçekten de titreşen proteinlerin oluşturduğu bir ağ var, proteinler birlikte “şarkı söylüyor”, melodileri hisleri doğuruyor, daha doğrusu hisler oluyor. Yine diyelim ki bu kuantum titreşimleri bir şekilde okyanusvari sinapslarda “tüneller” açıyor ve öbür tarafta başka bir kuantum “şarkısı”nı tetikliyor, tutarlılığı beynin tamamına yayıyor. Burada beyinde tam bir paralel evrenle karşı karşıyayız, nöronların ateşlediği bildiğimiz “klasik” evrenle el ele işlemesi gereken bir evren bu, senkronize ateşleme başka türlü nasıl olur da bilinçli algılar doğurur ya da sinir ileticileri,

büyük bir kesinlikle ortaya çıkardıkları bilinçli hali etkiler? Bu kuantum evreninin de beyinle kesinkes aynı biçimde bölümlere ayrılması gerekir. Böylece görmeyle (örneğin kırmızı görmekle) ilgili hislerin görsel işlem alanlarıyla sınırlı olması gerekirken, duygusal hislerin de sadece amigdala ya da orta beyin gibi bölgelerde titreşmesi gerekir. Buradaki sorunlardan biri, bütün nöronların mikroskobik altyapısının temelde aynı olmasıdır, bir nörondaki mikrotübüllerle başka bir nörondakiler arasında anlamlı bir farklılık yoktur, peki o zaman neden bazıları renk şarkısı söyler de diğerleri acı şarkısı söyler? Yutması en zor olan şey de hislerin bütün bedensel kaygıların en temel olanlarını yankılıyor olmasıdır. Maddenin, sevgi ya da müzik yankılayabilen temel bir özelliğini hayal edebiliyorum, ama ya karın ağrısı yankılayan? Mesane şişmesi hissidir diyebileceğimiz benzersiz bir titreşim var mıdır? Sanmıyorum. Tanrı zar atıyorsa, şurası kesin ki oyun bu değil. Peki ama kuantumlar değilse o zaman ne?



Bu bölümü bitirirken, bilinçle ilgili “zor problem”in cevabını nerede aramamızın en iyisi olacağını işaret etmek istiyorum. Cairns-Smith’in modern fiziğin “bodrum katındaki bomba” dediği paradoks da dahil olmak üzere bazı belirgin paradokslar hayli basit bir biçimde halledilebilir. Hislerin, doğal seçimle evrilmeleri için gerçekten de maddenin fiziksel bir özelliği mi olmaları gerekir? Mutlaka öyle olması gerekmez. Nöronlar hisleri kesin ve yeniden üretilebilir bir biçimde şifreliyorlarsa, yani bir grup nöronun belli bir biçimde ateşlemesi *her zaman* aynı hissi doğuruyorsa, hislerin maddenin fiziksel bir özelliği olması gerekmez. Bu durumda, seçim sadece nöronların temel fiziksel nitelikleri üzerinde etkili olur. Sözcük seçiminde her zaman olduğu gibi titiz davranan Edelman, “entail” (gerektirmek, doğurmak, kendisine bağlı bir koşul olarak ortaya çıkarmak) sözcüğünü tercih eder, nöronların bir ateşleme örüntüsü bir his *gerektirir, doğurur*; örüntü histen ayrılamaz. Aynı şekilde, bir genin bir protein gerektirdiğini söyleyebilirsiniz. Doğal seçim, genlerin dizilimleri

üzerinde değil, proteinlerin özellikleri üzerinde etkili olur, ama genler proteinleri kesin bir biçimde şifrelediğinden ve sadece gen kalıtımla miras alındığından, aynı kapıya çıkarız. Açlık ve susuzluk gibi ilksel duyguların, maddenin temel bir titreşimsel özelliği olmak yerine, belli bir nöron ateşlemesine bağlı olması bana daha muhtemel görünüyor, orası kesin.

En azından kısmen, hayli basit bir biçimde halledilebilecek bir başka paradoks da zihinlerimizin gayri maddi, hislerimizin kelimelere dökülemez olduğu algısıdır. Emeklilik döneminde zihnini bilinç alanında çalışmaya yöneltmiş bir başka iyi bilim insanına, New Yorklu doktor ve farmakolog José Musacchio'ya göre, esas kavrayış zihnin beynin varlığını tespit etmediği, edemeyeceğidir. Beyni de zihnin fiziksel özelliğini de bunun üzerine düşünerek algılayamayız. Ancak ve ancak bilimin nesnel yöntemleri zihinle beynin fiziksel işleyişini ilişkilendirmiştir. Geçmişte ne büyük yanılgılar içinde olduğumuzun en iyi örneklerinden biri, firavunlarını mumyalarken kalbi ve diğer organları büyük bir özenle koruyup (çünkü kalbin duygular ve zihnin merkezi olduğunu düşünüyorlardı) beyni burun deliğinden bir çengelle çekip çıkaran, kafatası boşluğunu uzun bir kaşıkla temizleyen ve çıkan pisliği atan Mısırlılardır. Mısırlılar beynin neye yaradığından emin değillerdi, sonraki dünyada da ona ihtiyaç olmayacağını düşünüyorlardı. Bugün bile beyin cerrahisi sırasında zihnin kendi kendisini tespit edebilme becerisinden tuhaf bir biçimde yoksun olduğunu anlıyoruz. Dünyaya o kadar duyarlı olan beynin kendisinde hiçbir acı reseptörü yoktur ve acıya tümüyle duyarsızdır. İşte bu yüzden nörocerrahi genel anestezi olmadan gerçekleştirilebiliyor.

Zihin neden kendi fiziksel işleyişini tespit edemiyor? Bir organizmanın, aslında bütün beyin gücünü çalılarının ardındaki kapları tespit etmeye, bu konuda ne yapacağına karar vermeye odaklanması gerekirken kendi zihni üzerine düşünüp taşınması açıkçası dezavantajdır. Hmm, zihnimin kendi kendisine, kapları tespit ettiğimde zihnimde ne kadar da büyüleyici bir nöral devre yankılanıyor dediğini duyar gibi oluyorum. Acaba bu hoş şerit-

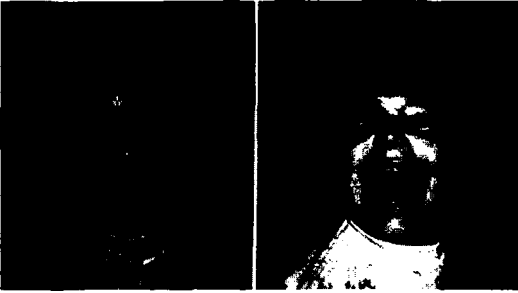
leri 55Hz'de mi yoksa daha düşük bir salınımda mı birleştiriyorum? Aaaggh! Seçilimin acımasızlığı karşısında, hayatta kalması muhtemel bir özellik değildir bu. Ama sonuç, algılarımız ve hislerimizin şeffaf olmasıdır: Oradadırlar, fiziksel nöral temellerine dair bir koku bile olmaksızın. Algılarımız ve hislerimizin fiziksel temellerinin farkında olmamız gerektiğinden, bilinçli zihinde güçlü bir gayri maddilik, bir maneviyat hissi vardır. Bazı insanlar için sıkıntı verici bir sonuç olabilir bu, ama kaçınılmaz görünüyor: Maneviyat hissimiz bilincin sadece-bilmek-gerek temelinde işlemeden doğuyor. Hayatta kalmak adına kendi beynimizden fırlatılıp atılmışız.

Aynısı büyük ölçüde, hislerin dile getirilemezliği açısından da geçerlidir. Daha önce savunduğum üzere, hisler çok kesin bir şifreyle, nöral ateşleme örüntüleriyle gerektiriliyor, onlardan doğuyorsa, hisler sözel olmayan hayli sofistike bir dilden başka bir şey değildir. Sözel diller bu sözel olmayan dile derinden kök salmıştır, ama aynı şey *olamazlar*. Bir his bir nöral bağlantıyla gerektiriliyor, ondan doğuyorsa, o hissi ifade eden kelime farklı bir nöral örüntüyle gerektirilir, doğar: Bir şifreden diğerine, bir dilden diğerine tercüme edilir. Sözcükler hisleri ancak tercümeyle tarif edebilir, bu yüzden de hisler kesinlikle dile getirilemezdir. Ama bütün dillerimiz ortak hislere demir atmıştır. Kırmızı rengi gerçekte yoktur, benzer bir şeyi algılamamış olan birine aktarılamayacak nöral bir inşadır. Aynı şekilde acı ya da açlık hissi, kahve kokusu, bütün bunlar sözcüklere çıpalandırılmış, sözel iletişimi mümkün kılan duyumlardır. Musacchio'nun dikkat çektiği üzere, her zaman "Ne demek istediğimi anlıyor musun?" demek zorunda kaldığımız bir nokta gelir. Aynı nöral yapıları ve hisleri paylaştığımız için, diller ortak insani deneyimimize dayanır. Hissiz dil, anlamdan yoksundur, ama hisler vardır, anlam vardır, sözel bir dil olmaksızın, sessiz duyguların ve sözsüz algıların çekirdek bilinci olarak.

Bütün bunlar şu anlama geliyor: Hislerin nöronlarla nasıl yaratıldığı sorusuna iç gözlem ya da mantık, felsefe ya da ilahiyat yoluyla değil, sadece deneylerle yaklaşabiliriz. Öte yandan, bilincin dayanaklarının hislerde, saiklerde ve hoşnutsuzluklarda



Şekil 9.1 Hidranensefali-
si olan bir çocuğun başı-
nın MRI taraması. Dikkat
çekicidir ki serebral
kortekslerin neredeyse
hiçbiri yoktur, kafatası da
onun yerine serebrospi-
nal sıvıyla doludur.



Şekil 9.2 Hidranensefa-
lisi olan dört yaşındaki
Nikki'nin yüzünde görü-
len mutluluk ve haz.

bulunması da, başka hayvanlarla sözel olarak iletişim kurmaksızın bilincin köklerine ulaşabileceğimiz anlamına geliyor, sadece akıllıca deneysel testlere ihtiyacımız var. Bu da kritik önemdeki nöral dönüşümü, ateşlemeden hisse dönüşümü hayvanlarda, hatta basit hayvanlarda inceleyebileceğimiz anlamına geliyor, çünkü bütün emareler, ilksel hislerin omurgalılar arasında yaygın olduğunu gösteriyor.

Bilincin itibar etmek istediğimizden daha basit ve yaygın olduğunu düşündüren dikkat çekici bir olgu, serebral kortekslerden yoksun olarak doğan az sayıda istisnai çocuğun hayatta kalması ve tanınabilir ölçüde insan bilinci göstermesidir (Şekil 9.1). Küçük bir darbe ya da gelişme sırasında benzer bir anormallik, hamilelik sırasında her iki korteksin de geniş kısımlarının reabsorpsiyonuna yol açabilir. Bu gibi çocukların doğuştan gelen birçok engeli olması, örneğin dilden ve iyi bir görüş yetisinden yoksun olmaları pek şaşırtıcı değildir, ama kafa karıştırıcı olan şey şudur ki normalde bilinçle ilişkilendireceğimiz hemen her

şeyin yokluğuna rağmen, bu çocukların bazıları hayli normal duygusal davranışlar gösterme, yeri geldiğinde gülme ve ağlama, küçük kardeşlerini kucakladıklarında gerçekten insani bir neşenin her tür emaresini gösterme yetisine sahiplerdir (Şekil 9.2). Daha önce, beyindeki birçok duygusal merkezin, beynin antik kısımlarında, hemen hemen bütün omurgalılarda bulunan beyin kökü ve orta beyinde bulunduğunu belirtmiştim. Bilincin kökleri, elbette ki bilinci muazzam derecede *incelikli hale getiren* yeni kortekslerde değil, beynin başka birçok hayvanla ortak olan daha eski ve basit kısımlarında bulunuyor olabilir pekala. Ve mesele böyleyse, o halde nöral dönüşüm, ateşlemeden hissetmeye dönüşüm, gizeminin bir bölümünü yitirir.

Bilinç ne kadar yaygındır? Bir tür bilinçölçer yapıncaya kadar, bunu hiçbir zaman kesin olarak bilemeyeceğiz. Ama ilksel duygular (susuzluk, açlık, acı, şehvet, boğulma korkusu vs.), bütün bunlar arılar gibi basit omurgasızlar da dahil olmak üzere beyni olan hayvanlar arasında yaygınmış gibi görünmektedir. Arılarda bir milyondan az nöron vardır (bizimse sadece korteksimizde, 23 milyar nöron bulunuyor), ama arılar şu meşhur danslarıyla yiyeceklerin bulunduğu yönü işaret etmekle kalmazlar, nektar dengesi kurnaz araştırmacılar tarafından değiştirilmiş olsa bile, önce en güvenilir nektar kaynağı olan çiçekleri ziyaret ederek en uygun davranışı sergilemek gibi hayli sofistike davranışlar gösterme yetisine de sahiptirler. Arıların bizim anladığımız anlamda bilinçli olduklarını savunmayacağım, ama onların basit nöral “ödül sistemleri” bir ödül talep eder, yani, *iyi bir his*, nektarın o tatlı tadını ister. Başka bir deyişle, arılar bilinçli olmak için gereken şeye sahiptir, henüz bilinçli olmasalar bile.

Ben, hislerin nihayetinde nöral yapılar olduğu, maddenin temel bir özelliği olmadığı kanısındayım. En yüksek evrimsel başarımın arı olduğu paralel bir evrende, onların davranışlarını açıklamak için yeni fizik kanunlarına başvurmak zorunda hisseder miydik kendimizi? Sanmıyorum. Ama hisler, işlerini yapan nöronlardan başka bir şey değillerse, neden bu kadar gerçek görünüyorlar, neden bu kadar gerçekler? Ben sadece hislerin ger-

çekmiş gibi geldiğini, çünkü gerçek bir anlamları, seçilimin çarmıhında edinilmiş bir anlamları, gerçek hayattan, gerçek ölümden gelen bir anlamları olduğunu düşünebiliyorum. Hislerin gerçekte nöral bir şifre, ama milyonlarca ya da milyarlarca kuşak boyunca edinilmiş anlamlarla zengin, canlı bir şifre olduğunu sanıyorum. Nöronlarımız bunu nasıl yapıyor bilemiyorum, ama bilinç, ölüm ve hayat hakkındadır, insan zihninin muhteşem zirveleri hakkında değil. Bilincin nasıl ortaya çıktığını gerçekten anlamak istiyorsak, kendimizi çerçeveden çıkarmamız gerekiyor.

Ölüm

Ölümsüzlüğün Bedeli



Paranın mutluluk satın alamayacağı söylenir. Gelgelelim antik devirlerde Lidya Kralı Karun'un zenginliğine diyecek yoktu, o da kendisini insanların en mutlusu olarak görüyordu. O sıralarda topraklarından geçmekte olan Atinalı devlet adamı Solon'un onayını arayan Karun, onun "Ölmemişse kimseyi mutlu sayma," sözünü işitince tedirgin olmuştu. Kaderin neler getireceğini kim bilebilirdi ki? Karun, Delfi Kahini'ne özgü muğlak bir kehanet üzerine harekete geçtiğinde Büyük Pers Kralı Keyhüsrev'e esir düştü ve canlı canlı yakılmak üzere bir kazığa bağlandı. Ama o kazıkta, azap dolu akıbeti yüzünden tanrılara verip verişirmek yerine, "Solon" diye mırıldandı sadece. Merak eden Keyhüsrev ona ne demek istediğini sorunca, Karun Solon'un nasihatini anlattı. Kendisinin de kaderin bir oyuncuğu olduğunu fark eden Keyhüsrev, kazıktan çözdürttüğü Karun'u danışmanlığına atadı. (Bazıları da Apollon'un bir fırtınayla Karun'un yardımına geldiğini anlatır.)

Hiç kuşku yok ki bir Yunanlı'dan başkası böyle bir cümle sarf edemezdi: Ölmemişse kimseyi mutlu sayma. Antik Yunan'da kader ve ölüm, en dolambaçlı yollardan araya girip insanları dizüstü çöktüren görünmez ellerin oyunuydu. Yunan tiyatroları dolambaçlı araçlarla doluydu; ölüm, muammadan farkı olma-

yan kehanetlerle çizilen kaderle düzenlenirdi. Baküs için yapılan coşkulu ayinler ve metamorfoz hikayelerinde olduğu gibi, Yunanlılar ölümcüllüklerinden bir şeyleri doğal dünyaya borçluymuş gibi görünüyordular. *Tam tersi de* söz konusudur: Batı kültürünün bakış açısında, hayvanların incelikli ölümleri, bazen Yunan tiyatrosundan tonlar taşırmış gibi görünür.

Sözgelimi, mayıs sineklerinin ölümünde Yunan trajedilerinin de ötesine geçen bir şeyler vardır, bu hayvanlar aylarca larva olarak yaşar, daha sonra ağız kısımları ve sindirim sistemleri olmayan yetişkinlere dönüşürler. O heyecan verici bir tek günden fazlasını yaşayan bir-iki tür mayıs sineği bile, kısa süre sonra açlıktan ölmeye mahkumdur. Peki ya Pasifik somonuna ne demeli? Yüzlerce kilometre göç ederek doğduğu akıntılara geri döner, ama hormonlarının ateşlediği bu Baküsvari coşkunluk orada birkaç gün içinde feci bir yokoluş ve ölümle yarıda kesiliverir.

Ya kraliçe arıya ne buyrulur? On altı yıl boyunca yaşına dair bir tek emare bile göstermez, sonunda bir gün sperm kaynağı kurur ve kendi kızları tarafından lime lime edilir. Peki Avustralya keseli faresi? On iki saat süren çiftleşme çılgınlığından sonra depresyon ve yorgunluktan ölüp gider, oysa hadım olsa engellenebilecek bir ölümdür bu. Trajedi ya da komedi, hiç kuşku yok ki dramatik. Bu hayvanlar da en az Oedipus gibi kaçınılmaz kaderin esiridir. Ölüm kaçınılmaz olmakla kalmaz, hayatın dokusuna yazılmış kaderler onu yönlendirir.

Bütün bu grotesk ölüm biçimleri arasında herhalde en trajik olan, bugün bizi en etkileyen Troyalı Tithonus'un ölümüdür. Tithonus'un tanrıça sevgilisi, Zeus'tan Troyalıya ölümsüzlük vermesini istemiş, ama ebedi gençlik dilemeyi unutmuştu. Homeros, "Tiksindirici ihtiyarlık üstüne çöktü" diye yazar, ihtiyarlık Tithonus'u sonu gelmez bir söylenmeye salmıştır. Tennyson onu "ölme kudretine sahip mutlu insanların evlerinin civarındaki loş tarlalara, mutlu ölümlerin çimlerle kaplı mezarlarına" bakarken resmeder.

Bu ölüm biçimleri arasında, bazı hayvanların hayatlarına programlanmış ani ölümle insanlıkla baş başa kalmış ihtiyarlığın

terk edilmişliği arasında, bir programın yokluğuyla Tithonus'un dile getirilemez sonsuz sonu arasında bir gerilim vardır. Tıbbın ilerlemesiyle bugün kendi başımıza getirdiğimiz şey de tam olarak budur, ömrümüz uzuyor, ama sağlığımız iyileşmiyor. Modern tıp tanrılarının bahsettiği her bir yılın sadece birkaç ayı sağlıklı geçiriliyor, geri kalan zaman ölüme uzanan bir gerileme içinde akıp gidiyor. Tithonus gibi biz de sonunda mezara girelim diye yakarıyoruz. Ölüm zalim bir kozmik şakaymış gibi görünebilir, ama yaşlanmak da tatsızdır.

Gelgelelim alacakaranlık yıllarımızda Tithonus'un gerçek yüzünü görmeye hiç gerek olmayacak. Zorlu fizik kanunları, ebedi gençliği de en az daimi hareket kadar sert bir biçimde aykırı bulur, ama evrim şaşırtıcı bir esnekliğe sahiptir ve uzun bir hayata genellikle Tithonus'un çektiği eziyetten uzak uzun bir gençliğin eşlik ettiğini göstermektedir. Koşullar değiştiğinde, hayatları acı vermeksizin uzayan, yani hastalıklara maruz kalmaksızın hayatları asıl uzunluğunun iki, üç, hatta dört katına çıkan hayvanların sayısı çoktur. Dikkat çekici örneklerden biri, California'da Sierra Nevada'da bir gölün soğuk, besinden yoksun sularında yaşayan dere alabalığıdır. Bu hayvanların ömürleri sadece altı yılken, dörde katlanıp 24 yılı aşkın bir süreye çıkmış, belirgin tek bedelse cinsel olgunlaşmanın gecikmesi olmuştur. Keseli sıçan gibi memeliler arasında da benzer bulgular görülür. Örneğin, birkaç bin yıl boyunca adalarda avcılığa karşı korunan keseli sıçanların ömürleri normalin iki katına çıkmış, yaşlanmaları da yarı yarıya yavaşlamıştır. Biz insanlar da azami ömür süremizi son birkaç milyon yıl içinde, belirgin herhangi bir cezalandırma olmaksızın iki katına çıkarmış bulunuyoruz. Evrimsel bir bakış açısıyla yaklaşıldığında, Tithonus'un bir mit olması gerekir.

Ama insanlık binlerce yıldır ebedi hayatı aramış, işaretlere bakılırsa da bulamamıştır. Hijyen ve tıptaki ilerlemeler ortalama ömür süremizi uzatmış olsa da, yaklaşık 120 yıl olan azami ömür süremiz bütün çabalarımıza rağmen inatla sabit kalmıştır. Kayıtlı tarihin en başında Uruk Kralı Gilgames, bir masal bitkisi biçimini almış olan ebedi hayatı aramış, destansı bir arayış sonrasında

bir mit gibi elinden kaçırmıştı. O zamandan beri de aynı şey oluyor. Hayat iksiri, kutsal kase, tek boynuzlu atın boynuzu, felsefe taşı, yoğurt, melatonin, hepsi de hayatı uzatmayı amaçlıyor, ama hiçbiri bunu başaramadı. Açıkta açığa şarlatanlar akademisyenlerle omuz omuza vererek yeniden gençleşme araştırmalarının tarihini renklendiriyorlar. Ünlü Fransız biyolog Charles Brown-Séquard kendi kendisine köpekler ve gine domuzlarının testislerinden alan sıvıları enjekte etmiş, 1889'da Paris'te Société de Biologie'ye kuvvetinin ve zihinsel kuvvetlerinin iyileştiğini bildirmiş, hatta afallamış topluluğun karşısında gururla işeyerek yay çizmişti. O yılın sonuna doğru, 12.000 doktor Brown-Séquard sıvısını uyguluyordu. Dünyanın dört bir tarafından cerrahlar çok geçmeden keçiler, maymunlar, hatta mahkumlardan alınan testisleri nakletmeye başladılar. Herhalde hepsinin en korkuncu Amerikalı şarlatan John R. Brinkley, keçi guddesi nakilleriyle muazzam bir servet kazandı, ama öldüğünde, nankörce açılmış binlerce davanın kurbanı olmuş meteliksiz bir adamdı. Bütün o küstah dehamıza rağmen, insanlığın yeryüzünde bize biçilmiş süreye tek bir gün bile ekleyip eklemediği kuşkuludur.

Dolayısıyla, evrimin esnekliğiyle, görünüşe bakılırsa ömür süresinin kolayca şekillenmesiyle bugünkü çabalarımızın tosladığı apaçık uzlaşmazlık arasında tuhaf bir uçurum vardır. Evrim ömür süresini nasıl bu kadar kolayca uzatıyor? Binlerce yıldır devam eden sefil başarısızlığımızın da açıkça ortaya koyduğu üzere, ölümün derindeki nedenlerini anlayamadığımız sürece bir yere varamayacağız. Dışarıdan bakıldığında, ölüm sersemletici bir "icattır": Doğal seçim normalde bireysel organizmalar düzeyinde etkili olur, ölümünün bana nasıl bir yararı olacağını ya da Pasifik somonun parçalanmakla ya da siyah dul örümceklerin yamyamlığa kurban gitmekle ne elde edeceğini görmek de zordur. Ama ölümün tesadüfi olmaktan çok uzak olduğu, hayatın başlangıcından hemen sonra bireylerin yararına (daha doğrusu Richard Dawkins'in unutulmaz tabiriyle, bencil genlerin yararına) evrildiği de kesindir. Sonumuzu daha iyi kılmak, Tithonus'un kederinden yakayı sıyırmak istiyorsak, en iyisi başa dönmektir.



Diyelim ki bir zaman makinesiyle üç milyar yıl öncesinde sahillerdeki sığ sulara indiniz. Göreceğiniz ilk şey gökyüzünün mavi değil, biraz Mars'ı hatırlatırcasına soluk, puslu bir kırmızı olduğudur. Sessiz denizler kırmızının tonlarını yansıtır. Güneşi açıkça seçmenizi engelleyecek kadar buğulu olsa da, bu pusun içinde hoş bir ılıklik vardır. Karada gözünüze pek bir şey çarpmaz. Kayalar çıplaktır, şurada burada nemli renksizlik parçaları görünür, bakteriler tehlikeli bir biçimde topraktaki uç beyliklerine tutunmuştur. Ot yoktur, hiçbir yeşillik yoktur. Ama sığ sularda çok sayıda tuhaf yeşilimsi kaya kubbeleri vardır. Besbelli ki hayatın eseridir bunlar, en uzununu yaklaşık bir metre boyundadır. Bugün de dünyanın en ücra, en ulaşılmaz körfezlerinde bunlara benzer birkaç ender yapıya hâlâ rastlanmaktadır: stromatolitler. Suları bulandıran bir şey yoktur. Hiç balık yoktur; yosunlar, yan yan kaçan yengeçler, dalgalanan denizşakayıkları yoktur. Oksijen maskenizi çıkarırsanız, çok geçmeden neden böyle olduğunu anlarsınız: Birkaç dakikaya kalmadan boğulup gidersiniz. Stromatolitlerin yakınında bile, oksijen yok denecek kadar azdır. Ama bunların mavi-yeşil bakterileri, siyanobakteriler, havayı bu tehlikeli gazın izleriyle doldurmaya başlamıştır. Saldıkları oksijen, bir milyar yıl içinde, gezegenimizi canlı yeşillere ve mavilere boyayacaktır. Ancak bundan sonra bu çıplak gezegenin bizim evimiz olduğunu anlarız.

Uzaydan bakıldığında, bu donuk kırmızı sisin içine girebilseydik, bu ilk dünyada az çok bugünküyle aynı olan tek bir özellik olduğunu görürdük: alglerin çiçekleri. Bunlar da siyanobakteridir, stromatolitlerle akrabadır, ama denizde geniş levhalar üzerinde yüzmektedirler. Uzaydan bakıldığında daha çok modern alg çiçeklerine benzerler; mikroskobun altında, antik fosiller modern siyanobakterilerin, örneğin *Trichodesmium*'un neredeyse tıpatıp aynısıdır. Çiçekler haftalarca dayanır, hızlı büyümeleri nehirlerden denizlere taşınan ya da yükselen akıntılarla okyanusların derinlerinden kaldırılan minerallerle hare-

kete geçer. Sonra bir gecede kaybolurlar, suda çözülürler, su bir kez daha sadece hayatın olmadığı kırmızı göğü yansıtır. Devasa okyanus çiçekleri bugün de bir gecede önceden hiçbir işaret vermeksizin kaybolup gidiyorlar.

Neler olup bittiğini takdir etmeye ancak kısa bir süre önce yaklaşabildik. Bu engin bakteri sürüleri sadece ölüp gitmiyor: Kendi kendilerini kasten öldürüyorlar. Her siyanobakteri kendi içinde bir ölüm makinesi, bizim hücrelerimizde bulunanlara dikkat çekici derecede benzeyen, hücreyi içerden yok etmeye vakfedilmiş antik bir enzim sistemi taşıyor. Bakterilerin kendi kendilerini ortadan kaldırması sevgilere o kadar ters düşüyor ki araştırmacılar bu kanıtları görmezden gelme eğilimi göstermişlerdir, ama kanıtlar artık görmezden gelinemeyecek kadar güçlüdür. Gerçek şu ki bakteriler “kasten” ölüyor, New Jersey’de Rutgers Üniversitesi’nde Paul Falkowski ve Kay Bridle’in sunduğu genetik kanıtlar da bakterilerin üç milyar yıldır böyle yaptığını ortaya koyuyor. Peki ama neden yapıyorlar bunu?

Çünkü ölümün bir getirisi var. Bakterisel çiçekler genetik olarak birbirine benzer, hatta birbirinin aynı trilyonlarca hücreden oluşurlar. Ama genetik olarak aynı hücreler her zaman aynı değildir. Hepsi genetik olarak aynı birkaç yüz farklı hücre tipinin bulunduğu kendi bedenlerimizi bir düşünelim. Hücreler, bizim örneğimizde çevre hücreler anlamında çevreden gelen, ince farklılıklar gösteren kimyasal emarelere cevaben farklı biçimlerde gelişir. Bakterisel çiçekler örneğinde, çevre, bazıları kimyasal emareler gösteren, hatta açıkça zehirler salan başka hücrelerin yanı sıra, fiziksel baskılar, örneğin gün ışığının miktarı, besinlerin elverişliliği, viral enfeksiyon vs. anlamına gelir. Bu yüzden hücreler genetik olarak aynı olabilir, ama çevreleri sonsuz derecede yeni biçimlerde onlara saldırır. Bu da farklılaşmanın temelidir.

Üç milyar yıl öncesinde farklılaşmanın ilk emarelerini görürüz; genetik olarak birbirinin aynı bakteriler hayat hikayelerine bağlı olarak farklı görünüm almaya, farklı kaderleri yaşamaya başlamışlardır. Bazıları sert, dirençli sporlar olur, bazıları kayaç

benzeri gömülmüş yüzeylere yapışan ince, yapışkan tabakalar (biyofilm) haline gelir; bazıları kabileden uzakta bağımsızca ser-pilip gelişir, bazıları da ölür gider.

Daha doğrusu, öylece ölüp gitmezler, karmaşık bir biçimde ölürler. Ölümün karmaşık mekanizmasının ilk kez tam olarak nasıl evrildiği belirsizdir. Akla en yakın cevap, ölümün bakterilere bulaşan bir tür virüs olan bakteriyofajlarla etkileşimle evrildiğidir. Viral parçacıklar bugün okyanuslarda çarpıcı bir bolluk gösterir: Deniz suyunun her mililitresinde yüz milyonlarcası vardır, sayıları bakterilerden en az yirmi kat daha fazladır; antik devirlerde de benzer sayılarda bulunduklarına kesin gözüyle bakılabilir. Bakteriler ile bakteriyofajlar arasındaki kesintisiz savaş, evrimin en önemli ve hiç dile getirilmemiş kuvvetlerinden biridir. Programlanmış ölüm bu savaşta ilk silahlardan biri olarak ortaya çıkmıştır.

Basit bir örnek, birçok bakteriyofajın kullandığı toksin-anti-toksin modülleridir. Bakteriyofajların az sayıdaki genlerinde, ev sahibi bakterileri öldürme yetisine sahip biraz toksin ve bakterileri toksine karşı koruyacak bir anti-toksin şifrelenmiştir. Alçakça bir biçimde, toksin uzun ömürlüdür, panzehiri ise kısa ömürlü. Bakteriyofajla enfekte olan bakteriler hem toksini hem anti-toksini üretir, böylece hayatta kalırlar; naif bakteriler, yani viral zincirleri koparmaya yeltenen bakteriler toksine duyarlıdırlar ve ölüp giderler. Çaresiz bakteriler için en basit kaçış yolu, anti-toksin genini almak, bunu kendi genomuna yerleştirmek, bakteriyofajla enfekte olmamış olsa bile ona koruma sağlamaktır. Böylece savaş yayılır, daha karmaşık toksinler ve anti-toksinler evrilir, savaş makinesi daha incelikli bir hal alır. Kaspaz enzimleri, muhtemelen siyanobakterilerde ilk kez böyle evrilmiş olabilir pekala.¹ Bu uzmanlaşmış “ölüm” proteinleri, hücreleri içerden keser. Silsileler halinde hareket ederler, bir ölüm enzimi sürüdeki bir sonraki enzimi harekete geçirir, böylece bir cellatlar ordusu hücrenin üstüne çullanır.² Önemli bir nokta, her kaspazda kendi inhibitörünün, eylemini engelleyecek bir “panzehir”in bulunmasıdır. Çok sayıda saldırı ve direnç düzeyinde bir ara-

ya gelen bütün bu toksin-anti-toksin sistemi, bakteriyofajlarla bakteriler arasında uzun zamandır devam eden evrimsel savaşı pekala gözler önüne serebilir.

Ölümün derin köklerinde muhtemelen bakteriler ile virüsler arasında devam eden bu gibi savaşlar yatıyor olsa da, enfeksiyon söz konusu olmasa bile intihar bakteriler için yararlıdır. Aynı ilkeler geçerlidir. Bütün bir çiçeği yok etme potansiyeline sahip bir fiziksel tehdit (örneğin, yoğun ultraviyole ışınımı ya da besin yokluğu), siyanobakterisel çiçeklerde programlanmış hücre ölümünü tetikleyebilir. En güçlü hücreler bir sonraki çiçeği dölleyecek sert sporlar haline gelerek bu tehdidi atlatabilir, genetik olarak aynı olmakla birlikte daha kırılğan kardeşleriye aynı tehdide ölüm mekanizmasını tetikleyerek karşılık vereceklerdir. Bu dinamiklerin cinayet mi yoksa intihar mı olarak görülmesi daha iyidir, bu bir zevk meselesidir. Tarafsızca söyleyebiliriz ki sonuçta, hasar görmüş hücreler bertaraf edildiğinde, evrimsel zaman içinde bakterisel genomun daha fazla kopyası hayatta kalır. En basit farklılaşma biçimidir bu, benzer hücrelerin hayat hikayesine bağlı olarak, hayat ile ölüm arasında doğrudan bir seçim yapılır.

Tıpatıp aynı mantık, çok hücreli organizmalar açısından çok daha kuvvetle geçerlidir. Burada hücreler her zaman genetik olarak benzerdir, kaderleri gevşek bir kolonide ya da alg çiçeğinde olduğundan çok daha sıkı bir biçimde birbirine bağlıdır. Basit bir yuvarda bile farklılaşma neredeyse kaçınılmazdır: Besinlerin, karbondioksit ve oksijenin elverişliliği, güneşe ya da avcılarının tehditlerine maruz kalma bakımından yuvarın içi ile dışı arasında bir fark vardır. Hücreler “isteseler” de aynı olamazlar. En basit uyarlamaların getirisi kısa süre sonra görülür. Örneğin, gelişimlerinin bazı aşamalarında birçok alg, kendilerini itmelerini sağlayan kamçılara sahiptir. Küresel bir kolonide, böyle kamçılı hücrelerin dışarıda olmasının bir getirisi vardır, birlikte hareketleri bütün koloniye hareket ettirir, sporlarsa (genetik olarak aynı hücrelerin farklı bir gelişim aşaması) içerde korunur. Böyle basit bir iş bölümü, ilk ilkel kolonilere tek tek hücreler karşısında bü-

yük bir avantaj sağlamış olsa gerektir. Fazla sayının ve uzmanlaşmanın avantajı, ilk tarımsal toplumlarda görülen avantajlara benzer; bu toplumlarda da gıda ilk kez geniş nüfusları destekleyecek kadar bol olmuş; savaş, çiftçilik, metal işçiliği, hukukçuluk gibi uzmanlaşmış işlere özel olarak zaman vakfedilmesini sağlamıştı. Hiç de şaşırtıcı değil, tarım toplumları çok geçmeden, benzer bir uzmanlaşmanın neredeyse imkansız olduğu küçük avcı-toplayıcı kabilelerin yerini almıştır.

En basit koloniler bile iki hücre tipi arasındaki temel farklılığı ortaya koyar: mikrop soyu ve “soma” (beden). Bu ayrımı ilk kez, herhalde on dokuzuncu yüzyılda Darwin’den sonraki en etkili ve kavrayış gücü en yüksek Darwinci olan saygıdeğer Alman evrimci August Weissman dikkat çekmiştir. (Kendisiyle beşinci bölümde tanışmıştık.) Weismann, sadece mikrop soyunun ölümsüz olduğunu, bir kuşaktan diğerine gen aktardığını, soma hücrelerininse vazgeçilebilir olduğunu, ölümsüz mikrop soyuna yardımcı olmaktan ibaret olduğunu söylüyordu. Bu fikir yarım yüzyıl boyunca, Nobel ödüllü Fransız Alexis Carrel tarafından itibarsız addedildi, Carrel daha sonra kendisini itibarsızlaştırdı, verileri düzmece olduğundan ayıplandı. Weismann başından beri haklıydı. Onun yaptığı ayrım, bütün çok hücreli organizmaların ölümünü açıklamaktadır. Doğası itibarıyla uzmanlaşma bedendeki sadece bazı hücrelerin mikrop hücresi olabileceği anlamına gelir, geri kalanların destekleyici bir rolü olması gerekir, sağlayacakları tek yarar, ortak genlerinin mikrop soyuna geçirilmesinden gelen, başkası adına kazanılmış kârdır. Somatik hücreler ikincil rollerini “kabul ettikleri”nde, ölümünün zamanlaması da mikrop soyunun ihtiyaçlarına bağlı hale gelir.

Bir koloniyle gerçek çok hücrelilik arasındaki fark en iyi, farklılaşmaya bağlılıkta görülür. Volvox gibi algler, topluluk hayatından yararlanırlar, ama bundan vazgeçebilirler ve tek hücreli olarak da yaşarlar. Bağımsızlık olasılığının korunması, erişilebilecek uzmanlaşma düzeyini azaltır. Açıktır ki nöronlar gibi uzmanlaşmış hücreler yaban hayatta ayakta kalamazlar. Gerçek çok hücreli hayata ancak kendilerini davaya tamamen adamaya

“hazır” hücreler ulaşır. Onların bu bağlılığının gözetim altında olması gerekir, bağımsızlığa dönme yolunda herhangi bir girişim ölümle cezalandırılabilir. Başka hiçbir şey işe yaramaz. Hücreler kendi başlarına takılıyor olsalar, çok hücreli hayatın nasıl imkansız olacağını takdir edebilmek için, milyarlarca yıldır devam eden çok hücreli yaşama rağmen, bugün bile kanserin yol açtığı yıkımı bir düşünün. Yalnızca ölüm, çok hücreli hayatı mümkün kılar.

İlk çok hücreli organizmalarda bile, hücrelerin ihlallere karşı ölüm cezasıyla tehdit edilmesi büyük bir evrimsel sıçrama gerektirmiyordu. İki tip hücrenin birleşmesinden, karmaşık “ökaryot” hücrelerin oluştuğunu dördüncü bölümden hatırlarsınız: Ev sahibi hücre ile bakteri daha sonra evrilip mitokondrileri, bugün enerji üreten minik santralleri oluşturuyordu. Mitokondriler, serbest yaşayan ataları siyanobakteriler gibi, hücreleri içerden parçalamak için gerekli kaspaz enzimlerine sahip bir grup bakteriydi. Bu enzimleri nereden aldıkları konumuz dışındadır. (Belki de bunlar siyanobakterilerden aktarılmıştı ya da tersi sözkonusuydu, iki grup da bunları uzak bir ortak atalarından almıştı.) Mesele şudur ki mitokondriler ilk ökaryot hücrelere, tam kapasite çalışan bir ölüm aygıtı miras bırakmıştır.

Ökaryotlar bakterilerin kaspaz enzimlerini almaksızın çok hücreli organizmalara bu kadar başarıyla evrilebilir miydi sorusu ilginç bir sorudur, ama kaspaz enzimleri sayesinde onları durduracak hiçbir şey kalmamıştır. Gerçek çok hücrelilik, ökaryotlarda en az beş kez birbirinden bağımsız olarak evrilmiştir: kırmızı alglerde, yeşil alglerde, bitkilerde, hayvanlarda ve mantarlarda.³ Örgütlenmeleri itibarıyla bu ayrı hayat biçimlerinin pek az ortak noktası vardır, ama hepsi de hücrelerini izler ve ihlalleri dikkat çekici derecede benzer kaspaz enzimleri kullanarak ölümle cezalandırır. İlginçtir, hemen hemen bütün örneklerde mitokondriler hâlâ başlıca ölüm tellallerıdır; hücrelerin içinde çelişkili mesajları birleştiren, gürültüyü bertaraf eden ve gerektiğinde ölüm aygıtını harekete geçiren merkezlerdir. Dolayısıyla herhangi bir çok hücreli hayat biçimi için hücre ölümü gerekli olsa da, evrim-

sel yeniliklere pek az ihtiyaç duyulmuştur, ihtiyaç duyulan makine ilk ökaryot hücrelere mitokondriler yoluyla ithal edilmiş, hafif değişiklikler olmakla birlikte bugüne kadar genel olarak aynı kalmıştır.

Ama hücrelerin ölümüyle, koca koca organizmaların ölümü arasında büyük bir fark vardır. Hücrelerin ölümü çok hücreli organizmaların yaşlanmasında ve ölümünde önemli bir rol oynar, ama bütün bedensel hücrelerin ölmesi gerektiğini ya da aynı derecede vazgeçilebilir başka hücrelerin onların yerini alması gerektiğini söyleyen bir kanun yoktur. Tatlı su denizsakayığı *Hydra* gibi bazı hayvanlar esasen ölümsüzdür, hücreler ölür ve yerlerini yenileri alır, ama organizma bir bütün olarak hiç yaşlanma belirtisi göstermez. Hücrelerin hayatı ile hücreysel ölüm arasında uzun vadeli bir denge vardır; aynı ırmağa iki kez girilmez, çünkü su durmadan akar, yenilenir, ama ırmağın kıyıları, hacmi ve şekli değişmeden kalır. Yunan bir filozof dışında herkese göre ırmak, aynı ırmaktır. Organizma için de aynı şey geçerlidir, hücreler de tıpkı su gibi yenilenir, ama organizma bir bütün olarak değişmeden kalır. Ben benim, hücrelerim değişse bile.

Bütün bunlar başka türlü olamazdı. Hücre hayatı ile hücre ölümü arasındaki denge değişseydi, organizma sel ya da hava akımındaki bir ırmaktan daha istikrarlı olmazdı. Hücre ölümünü daha az muhtemel kılmak için "ölüm" ayarlarını değiştirdiğinizde sonuç kanser, durdurulamaz büyüme olur. Ama hücre ölümlerini çok olası kılarırsanız, sonuç eriyip gitmektir. Kanser ve dejenerasyon aynı madalyonun iki yüzüdür: İkisi de çok hücreli hayatı baltalar. Ama basit *Hydra* dengesini ebediyen koruyabilir, insanlar da günde milyarlarca hücre değiştirmelerine rağmen yıllarca aynı ağırlıkta, aynı yapıda kalabilirler. Sadece yaşlandığımızda bu denge kaybolur, sonra ilginç bir şekilde madalyonun iki yüzünden birden mustarip olmaya başlarız. Kanser ve dejeneratif hastalıklar ile ileri yaş birbirine ayrılmaz bir biçimde bağlıdır. Peki ama neden, neden organizmalar yaşlanır ve ölür?



Bu konuda, 1880'lerde Weismann'a kadar uzanan en popüler fikir, Weismann'ın da çabucak fark ettiği üzere yanlıştı. Weismann başta yaşlanma ve ölümün, nüfusları yaşlı, yıpranmış bireylerden kurtardığını, onların yerine cinsellik sayesinde yeniden harmanlanmış yeni bir gen kümesiyle dolu yeni modeller geçirdiğini ileri sürmüştü. Bu fikir ölüme bir tür soyluluk ve simetri katar, dinî bir amacın görkemine pek erişemese de, ölümü daha büyük bir davanın hizmetine sokar. Bu bakış açısına göre bir bireyin ölümünün türe yararı dokunur, bazı hücrelerin ölümünün organizmaya yararının dokunduğu gibi. Ama Weismann'ı eleştirenlerin de işaret ettiği üzere, bu argüman döngüseldir: Yaşlı bireyler ancak yaşlanırlarsa "yıpranırlar", dolayısıyla Weismann açıklaması gereken şeyi varsaymıştır. Ölümün nüfuslara yararı dokunuyorsa bile, bireylerin yaşla birlikte "yıpranmasına" neden olan şey nedir? Bu soru cevaplanmadan kalmıştır. Üçkağıtçıları, kanser hücreleri gibi artlarında her biri aynı bencil genlerle donanmış daha fazla yavru bırakarak ölümden kaçan bireyleri ne durduracaktır? Bir toplumun kanserini ne durduracaktır?

Bu sorunun Darwinci cevabını ilk kez Peter Medawar, 1953'te Londra'da University College'daki meşhur konferansında vermişti. Medawar yaşlanmaya bağlı olmaksızın istatistiksel bir ölüm olasılığı olduğunu söylüyordu: otobüs çarpması ya da gökten bir taşın düşmesi, bir kaplanın ısırması ya da bir hastalığa kurban gitme sonucu ölmek gibi. Ölümsüz bile olsanız sonsuza kadar yaşamanız olasılık dışıdır. Üreme kaynaklarını hayatın erken bir dönemine yoğunlaştıranlar, telaşsız bir takvim izleyen bireylere, örneğin her 500 yılda bir üremeyi seçenlere ve maalesef 450 yaşında da yakayı ölüme kaptıranlara göre daha fazla yavru sahibi olurlar. Cinselliğe ne kadar erken yaşta başlarsanız, tembel kuzenlerinize nazaran, geride sizin "erken cinsellik" genlerinize sahip daha fazla yavru bırakırsınız. Problem de burada yatar.

Medawar'a göre bütün türlerin, bireylerin büyüklüğüne, metabolik hızlarına, doğal avcılarına, kanatlar vs. gibi fiziksel özelliklerine bağlı olarak istatistiksel olarak olası bir ömürleri vardır. Bu istatistiksel ömür diyelim ki 20 ylsa, üreme döngüle-

rini bu süreçte tamamlayan bireyler normalde, böyle yapmayan bireylere nazaran daha fazla yavru bırakırlar. “Tura atan” genler, atmayanlardan daha iyi sonuç alacaktır. Medawar, biz istatistiksel olarak öldükten sonra kalp hastalığına neden olan genlerin genomda biriktiği sonucuna varır. İnsanlarda doğal seçilim, 150 yaşında Alzheimer hastalığına yol açan bir geni, kimse o kadar uzun yaşamıyorsa ortadan kaldırmaz. Eski devirlerde 70 yaşında Alzheimer’a neden olan genler de doğal seçilimin ağından kaçmıştı, çünkü pek az kişi 70 yaşından fazla yaşayabilmişti. Medawar’a göre yaşlılık, ölmemiz gerekirken işlemeyi sürdüren genlerin neden olduğu bir gerilemedir, seçilimin erişemediği yüzlerce, hatta binlerce, aslında ölü genin işleyişidir. Sadece insanlar Tithonus’un sefaletini yaşar, çünkü sadece insanların avcılar ve birçok ölümcül bulaşıcı hastalık gibi birçok istatistiksel ölüm nedeninin bertaraf edilmesiyle suni olarak uzatılmış ömürleri vardır. Bir gen mezarlığını kazmışsındır, o genler de bizi mezarımıza sürerler.

Amerikalı büyük evrimci G. C. Williams, hiç kuşku yok ki bütün bilim alanlarında olup olabilecek en berbat isimlerden birine sahip bir fikir ileri sürerek, Medawar’ın fikirlerini ondan bağımsız olarak geliştirdi: *Antagonistik pleiotropi*. Bu isim benim gözümün önüne yeme çılgınlığına tutulmuş bir deniz canavarını getiriyor. Aslında bu isim, genlerin, bazıları diğerlerinden daha iyi, bazıları doğrudan zararlı birkaç etkiye sahip olmalarını ifade eder. Klasik ve maalesef talihsiz bir örnek Huntington korasıdır, bu hastalık orta yaşlarda hafif seyirmeler ve sendelemelerle başlayan, nihayetinde yürüme, konuşma, düşünme ve akıl yürütme becerilerini insanın elinden alan amaçsız bir zihinsel ve fiziksel hastalıktır. Bu “sendeleme çılgınlığı”na tek bir gende, kendisini üreme olgunluğuna erişinceye kadar göstermeyen bir kusur neden olur. Bazı tereddütlü kanıtlar, Huntington korası geliştiren insanların hayatın erken dönemlerinde cinsel olarak başarılı olmasının daha muhtemel olduğunu göstermektedir, gerçi neden böyle olduğu tam olarak bilinmemektedir; bu etkinin büyüklüğü de çok küçüktür. Ama mesele şudur ki küçücük bir ölçüde

cinsel başarı doğuran bir gen bile seçilir ve daha sonra en korkutucu dejenerasyona yol açsa da genomda kalır.

Hayatın sonraki dönemlerindeki hastalıklarla tam olarak kaç tane genin ilgisi olduğu kesin değildir, ama fikir yeterince basittir ve açıklayıcı bir cazibesi vardır. Hayatın ilk dönemlerinde yararlı olan, kan pigmenti hemoglobini oluşturan, ama daha sonra aşırı demir yükü kalp yetmezliğine yol açtığından yıkıcı etkiler doğuran demir birikiminin sorumlusu bir gen hayal etmek kolaydır. Hiç kuşku yok ki modern tıpla daha uyumlu bir evrimci fikir daha yoktur. Konuşma dilinde, eşcinsellikten Alzheimer'a kadar her şeyin bir geni vardır. Evet, gazetelerin satmasına yardımcı olan bir dildir bu. Ama mesele bundan da derine iniyor. Belli genetik varyantların belli koşullara yol açması fikri bütün tıbbi araştırmalara nüfuz ediyor. İyi bilinen tek bir örnek üzerinde duralım: *ApoE* geninin üç tane yaygın varyantı bulunuyor: *ApoE2*, *E3* ve *E4*. Batı Avrupa'da nüfusun yüzde 20'sinde *ApoE4* varyantı bulunuyor, bu geni taşıyan ve bunu bilen insanlar hiç kuşku yok ki aksini dilerlerdi: Bu gen istatistiksel olarak Alzheimer hastalığı, ayrıca kardiyovasküler hastalıklar ve felç riskinin yüksek olmasıyla ilgilidir. Eğer iki tane *ApoE4* varyantı taşıyorsanız, genetik donanımınızı harekete geçirmemek için yediğinize içtiğinize dikkat etseniz, düzenli olarak spor yapsanız iyi olur.⁴

ApoE4'ün aslında neye "yaradığı" bilinmiyor, en azından ben bilmiyorum, ama bu varyantın bu kadar yaygın olması, hayatın önceki zamanlarında sonraki zamanlardaki dezavantajlarını dengeleyecek bir şey için yararlı olabileceğini düşündürüyor. Ama bu yüzlerce, hatta binlerce örnekten sadece biri. Tıbbi araştırmalar bu tür genetik varyantları araştırıyor ve onların zararlı etkilerini, bunları hedef alan yeni (ve genellikle de pahalı) ilaçlarla dengeleme girişiminde bulunuyor. Huntington korasının tersine, yaşla ilgili hastalıkların çoğu genetik ve çevresel etkilerin iç içe geçtiği yoğun bir doku oluşturur. Genellikle çok sayıda gen patolojiye katkıda bulunur. Örneğin, kardiyovasküler hastalıklarda, çeşitli genetik varyantlar insanları yüksek tansiyona, kanın çabuk pıhtılaşmasına, obezliğe, yüksek kolesterole ya da

tembelliğe yatkın hale getirir. Yüksek tansiyona yatkınlık tuzlu, yağlı bir diyet, bira ve sigara sevgisi, televizyonun spora tercih edilmesiyle birleşiyorsa, hastalıklara yakalanma riskimizin ne olduğunu belirlemek için bir sigorta şirketine ihtiyacımız yoktur. Oysa genellikle, hastalık riskinin tahmin edilmesi nankör bir iştir ve genetik donanımımızın anlaşılması da hâlâ emekleme aşamasındadır. Bir toplama yaptığımızda bile, yaşla ilgili hastalıklara toplam genetik katkı genellikle yüzde 50'den azdır. Hemen her zaman en büyük risk etkeni yaşlanmadır; sadece birkaç talihsiz kişi 20'lerinde ya da 30'larında kanser hastası olur ya da felç geçirir.

O halde, genellikle, yaşla ilgili hastalıklara dair modern tıbbi kavrayış, Medawar'ın sonradan harekete geçen genlerle ilgili evrimsel tablosuna yakından uyuyor. Birkaç yüz gen hastalıklara yatkınlığımıza katkıda bulunur, her birimizin de kendimize özgü bir risk yelpazesi, bir gen mezarlığı vardır; bunların etkileri hayat tarzımıza ya da başka genlere bağlı olarak iyileşebilir ya da güçlenebilir. Ama yaşlanmayla ilgili bu bakış açısında iki ciddi sorun vardır.

İlki burada seçtiğim sözcüklerde gizlidir: Hastalıklardan bahsediyorum, yaşlanma semptomlarından, yaşlanmanın temelindeki nedenden değil. Bu gibi genler belli hastalıklarla ilişkilidir, pek azı yaşlanmanın kendisine katkıda bulunuyormuş gibi görünür. Hiçbir hastalıktan mustarip olmadan 120 yaşına kadar gelmek, ama yine de yaşlanmak ve ölmek mümkündür. Geri kalanlarımız için, yoldan çıkmış genlerin olumsuz etkilerinin maskesi yaşlanmayla beraber düşer: Gençken bunların sıkıntısını çekmeyiz, sadece yaşlandığımızda çekeriz. Tıpta, yaşlılıkla ilgili hastalıkları patolojik (bu yüzden de "sağaltılabilir") olarak görme, ama yaşlılığı bir hastalık yerine bir "hal", dolayısıyla "sağaltılamaz" görme eğilimi mevcuttur. Yaşlıları "hastalıklı" olarak damgalamama yönünde anlaşılabilir bir direnç gözlenir. Yaşlanmayı yaşla ilgili hastalıklardan ayırmaya çalıştığı için, bu bakış açısı yararlı olmasa da, bu ayrım Medawar hakkında altını çizmek istediğim noktayı gayet hoş bir biçimde ortaya koyuyor.

Medawar yaşa bağlı hastalıklarda genlerin rolünü açıklamıştı, yaşlanmanın temelindeki nedeni değil.

1988'i izleyen on yıl içinde, Irvine California Üniversitesi'nde çalışan David Friedman ve Tom Johnson, iplik kurtlarında hayat uzatan ilk mutasyonu bildirdiklerinde, bu ayrımın gücü bir şok yaratmıştı. Age-1 adı verilen bu gendeki mutasyonlar normal ömür süresini yaklaşık 22 günden 46 güne çıkarıyordu. Sonraki yıllarda, iplik kurtlarının yanı sıra, mayadan tutun meyve sineklerine ve farelere kadar çok sayıda hayat biçiminde çok sayıda benzer mutasyon bildirildi. Bir süre boyunca bu alanda, 1970'lerde parçacık fiziğinin yaşadığı şaşaalı günlerin havası esti, ömrü uzatan çok sayıda mutasyondan oluşan bir silsilenin katalogu çıkarıldı. Yavaş yavaş bir örüntü ortaya çıkıyordu. Mutasyona uğramış genlerin hemen hemen hepsi, ister mayada olsun ister sineklerde ya da farelerde, aynı biyokimyasal yoldaki proteinleri şifreliyordu. Başka bir deyişle, mantarlar kadar memelilerde de geçerli olan, ömür uzunluğunu kontrol eden istisnai derecede korunmuş bir mekanizma vardı. Bu yoldaki mutasyonlar ömrü uzatmakla kalmıyor, bunu yaparken yaşlılıktaki hastalıkları erteleyebiliyor, hatta silebiliyordu. Zavallı Tithonus'un tersine, ömrün iki katına çıkarılması, sağlıklı yaşama süresini de iki katına çıkarır.

Hastalıkla ömür uzunluğu arasındaki bağlantı şaşırtıcı gelmemelidir. Ne de olsa hemen hemen bütün memeliler şeker, felç, kalp hastalıkları, körlük, hafıza kaybı vs. dahil yaşlılıkla ilgili benzer hastalıklardan mustarip olur. Fakat bir fare, yaklaşık üç yaşındayken (yaşlanmaya başladığında) kansere yakalanır, insanlarsa aynı hastalığa 60-70 yaşlarında yakalanır. Açıktır ki "genetik" hastalıklar bile kronolojik zamandan çok yaşlılıkla ilgilidir. Ömür uzunluğuyla ilgili mutasyonlarda asıl şaşırtıcı olan, sistemin tamamının gösterdiği esnekliktir. Bir tek gendeki bir mutasyon ömür uzunluğunu iki katına çıkarabilir ve yaşlılıkla ilgili hastalıkları "askıya alabilir".

Bu bulguların önemi ne kadar vurgulansa azdır. Kanserden kalp hastalıklarına ve Alzheimer hastalığına varıncaya kadar,

yaşlılıkla ilgili bütün hastalıklar prensipte, tek bir yoldaki basit permütasyonlarla ertelenebilir, hatta bunlardan kaçınılabilir. Sarsıcı bir sonuçtur, ama burnumuzun dibindedir işte: Yaşlanmayı ve yaşla ilgili bütün hastalıkları tek bir ilaçla “iyileştirmek”, “yaşlı” insanlarda Alzheimer gibi yaşla ilgili hastalıkları iyileştirmekten daha kolay olacaktır. Medawar’ın yaşlanmayla ilgili açıklamasının yanlış olduğunu düşünmemin ikinci sebebi de budur. Kendi gen mezarlığımıza mahkum değiliz: En başta yaşlanmadan kaçınabilirsek, gen mezarlığının kenarından geçebiliriz. Yaşla ilgili hastalıklar kronolojik zamana değil, *biyolojik yaş*a bağlıdır. Yaşlanmayı iyileştirirseniz, yaşlılıkla ilgili hastalıkları da iyileştirirsiniz, hem de hepsini. Bütün bu genetik araştırmalardan çıkan asıl sonuç ise yaşlanmanın önlenebilir olduğudur.



Ömür uzunluğunu kontrol eden biyokimyasal bir yolun varlığı, evrimle ilgili birkaç soru doğuruyor. Hatalı olan ilk çıkarım ömür uzunluğunun doğrudan genlerde yazılı olduğu, yaşlanma ve ölümün, başta Weismann’ın ileri sürdüğü üzere bir bütün olarak türün yararına olacak şekilde programlanmış olduğudur. Madem bir tek mutasyon ömrü uzatıyor, neden daha fazla uçkağıtıcıyla karşılaşmıyoruz, neden daha fazla hayvan kendi yararlarına sistemden çıkmayı tercih etmiyor? Basit olması gerekir. Hayvanlar uçkağıtıcılık yapmıyorlarsa, uçkağıtıcılığın cezası var demektir, uzun bir ömrün avantajlarını geride bırakacak kadar ağır bir ceza. Mesele buysa, hastalıklarımızı tercih edebiliriz pekala.

Bir dezavantaj vardır. Yine cinsellik. Ömürlerimizi uzatmak, hastalıklardan kaçınmak istiyorsak, ölümle yaptığımız sözleşmenin altına düşülmüş dipnotu okumamız iyi olur. Ömür uzatan bütün genlerdeki (*gerontogenler*) mutasyonların ömrü kısaltmak yerine uzatacak şekilde hareket etmesi ilginçtir. Gerontogenlerin kontrol ettiği biyokimyasal yolun niteliğini değerlendirdiğimizde bu bir anlam ifade ediyor. Mesele yaşlanmakla değil, cinsel olgunlukla ilgilidir. Bir hayvanın cinsel olgunluğa erişmesi, çok fazla kaynak ve enerji gerektirir, bunlar mevcut değilse gelişmeyi

ertelemek, kaynaklar bollaşınca kadar beklemek daha iyidir. Bu da çevresel bolluğun izlenmesi ve doğrudan hücrelere hitap eden bir biyokimyasal birime çevrilmesi gerektiği anlamına gelir: “Bol bol gıda var, üremek için hazırlanmaya uygun bir zaman. Sekse hazırlanın!”

Bolluğu işaret eden biyokimyasal sinyal, insülin hormonudur, onunla birlikte, başta insülinle ilişkili büyüme faktörü olmak üzere, daha uzun süreler (haftalar ya da aylar) boyunca etkili olan büyük bir akraba hormon ailesi de harekete geçer. İsimleri bizi ilgilendirmiyor, sırf iplik kurtlarında insülinle akraba 39 tane hormon vardır. Burada asıl mesele, gıda bol olduğunda, insülin hormonlarının harekete geçmeleri, cinselliğe ayarlanmış bir dizi gelişimsel değişikliği yönetmeleridir. Gıda mevcut değilse, bu yollar sessizleşir ve cinsel gelişme ertelenir. Ama sessizlik hiçbir şeyin olmadığı anlamına gelmez. Tam tersine, sinyalin yokluğu başka alıcılar tarafından tespit edilir ve bunlar da hayatı askıya alır. Bekle, derler, daha iyi koşulları bekle, sonra yine seksi denersin. Bu süre zarfında beden olabildiğince uzun bir süre boyunca bozulmamış halini korur.

Cinsellik ile uzun ömürlülük arasında bir alışveriş olduğu fikri Britanyalı gerontolog Tom Kirkwood tarafından 1970’lerin ortalarında, gerontogenlerin keşfedilmesinden epey önce ortaya atılmıştı. Kirkwood, enerjinin sınırlı ve her şeyin bir bedeli olduğunu söyleyen ekonomik bir gerekçeye dayanarak, tam da böyle bir “tercih”i resmetmişti. Bedenin korunmasının enerji maliyeti, seksin enerji maliyetinden düşülmelidir, bunların her ikisini de eşzamanlı olarak yapmaya çalışan organizmalar, kaynaklarını bölen organizmalar kadar iyi dayanmazlar. En aşırı örnekler, Pasifik somonu gibi sadece bir kere üreyen ve yavrularını yetiştirmeyen hayvanlardır. Bu durumda, onların feci ölümü bir ölüm programından çok, kaynakların tamamının hayat işine, üremeye ayrılması olarak açıklanır.⁵ Birkaç gün geçmeden paramparça olurlar, çünkü kaynaklarının yüzde 100’ünü sekse ayırırlar ve bütün bu kaynakları da bedenin korunmasından çekerler. Farklı seferlerde bir kereden fazla üreyen hayvanların sekse daha az,

bedenin korunmasına daha fazla kaynak tahsis etmesi gerekir; bizim gibi, yavrularını yetiştirmeye ağırlıklı bir yatırım yapan hayvanlarsa bu dengeyi daha da ileri taşımaları gerekir. Ama bütün örneklerde bir tercih vardır, hayvanlarda bu tercih normalde insülin hormonlarıyla kontrol edilir.

Gerontogenlerdeki mutasyonlar sessizlik numarası yapar. Bolluk sinyalinin etkisiz hale getirir, bedenin korunmasıyla ilgili genleri uyarırlar. Gıda bol bile olsa, mutant gerontogenler cevap vermez. Birkaç ironik durumdan ilki, insülini hatırlatan sirenlerle direnmeleridir. İroni şudur ki insanlarda insülin direnci uzun ömürlülük getirmez, yetişkinlikte diyabetin gelişmesine neden olur. Sorun şudur ki aşırı yeme, onunla birlikte kıt kaynakları daha iyi zamanlara saklama konusundaki fizyolojik kararlılık kilo almaya, diyabete ve daha erken ölüme yol açar. İkinci bir ironi: Ömrü uzatmanın, seksi ertelemeceğin cezası yerli yerinde durur. Kısırlık olarak ifade edilir. Diyabetin kısırlıkla ilişkili olması hiç de sürpriz değildir. İnsülinin engellenmesi, sadece çoğunlukla açsak ömrü uzatır, potansiyel bedeli de hiç çocuk sahibi olmamaktır. Elbette ki bunu yıllardır biliyoruz, işte bu da üçüncü ironidir. Bu olgu çok hoşumuza gitmiyor olabilir, ama 1920'lerden beri, orta karar bir açlığın ömrü uzattığını biliyoruz. Buna kalori kısıtlaması deniyor. Fareler dengeli beslenir, ama normalden yaklaşık yüzde 40 daha az kalori aldıklarında, iyi beslenmiş kardeşlerinden iki kat daha fazla yaşar, yaşlılık hastalıklarından daha az çekerler. Daha önce olduğu gibi yaşa bağlı hastalıklar tanımsız bir süre boyunca ertelenir, ortaya çıkmaları daha az muhtemel olur. Bu gibi kalori kısıtlamalarının insanlarda da farelerdeki etkilerin aynısını gösterip göstermediği belirsizdir, ama o kadar belirgin bir düzeyde olmasa da, gösterdiği yönünde işaretler vardır: Biyokimyasal araştırmalar bizde de genel olarak benzer değişikliklerin gerçekleştiğini göstermektedir. Ama kalori kısıtlamasının etkilerini yıllardır biliyor olmamıza rağmen, nasıl ya da neden işlediği, insanlarda gerçekten işleyip işlemediği hakkında dikkat çekici düzeyde az bilgi sahibiyiz.

Bunun sebeplerinden biri, insanlarda ömür uzunluğuna iliş-

kin uygun bir araştırmanın, en gayretlilerin bile hevesini söndürecek kadar uzun sürecek, yıllar alacak olmasıdır.⁶ Bir diğer sebep de uzun yaşamanın yavaş yaşamak, daha sıkıcı hayatlar sürmek anlamına geldiği yolunda uzun zamandır varlığını sürdüren algıdır. Bu doğru değildir, böyle olduğu için de bir umutlanma nedenidir. Kalori sınırlaması, genel enerji düzeyini düşürmeksiniz enerji kullanımı verimliliğini iyileştirir; genel enerji düzeyini düşürmek şöyle dursun, tam tersi, artırma eğilimi gösterir. Ama bu konuda bu kadar az şey biliyor olmamızın temel sebebi, kalori sınırlamasının ardındaki biyokimyanın dokudan dokuya, türden türe kaleydoskopik bir farklılık gösteren, çözülmeye direnen geri besleme devrelerinden, paralel hatlardan, fazlalıklardan oluşan korkunç bir keşmekeş olmasıdır. Gerontogenlerin önemi, bu karmaşık ağdaki birkaç önemsiz değişikliğin büyük bir fark yaratacağını göstermelerinde yatar. Hiç de şaşırtıcı değil, bu bilginin araştırmacılar üzerinde canlandırıcı bir etkisi olmuştur.

Kalori sınırlamasının, etkilerini en azından kısmen, gerontogenlerin kontrol ettiği yollar üzerinden gösterdiği varsayılır. Bir makas değişikliği söz konusudur: cinsellik ya da uzun ömürlülük. Kalori sınırlamasıyla ilgili sorunlardan biri, bu makası tamamen açmasıdır, yani uzun ömürlülüğün yanı sıra cinselliğin var olması imkanı çok azdır. Ama gerontogenler söz konusu olduğunda durum her zaman böyle değildir. Gerontogenlerdeki bazı mutasyonlar cinsel olgunlaşmayı bastırır (örneğin orijinal *age-1* mutasyonu yüzde 75 bastırır), ama hepsi böyle yapmaz. Birkaç gerontogenin cinselliği çok az bastırarak hem ömrü uzattığı, hem de sağlığı artırdığı anlaşılmıştır, tümüyle lağvetme yerine ılımlı bir erteleme söz konusudur. Bazıları küçük hayvanlarda cinsel gelişimi engeller, ama daha yaşlı yetişkinler üzerinde belirgin olumsuz etkileri yoktur. Burada da yine ayrıntılar bizi ilgilendirmiyor: Önemli olan cinselliği uzun ömürlülüğün inceliğiyle ayırmanın mümkün olmasıdır, uzun ömürlülüğün sorumlu genleri cinselliği etkisiz hale getirmeksizin etkinleştirebilmektir.

Kalori sınırlamasında merkezi önem taşıyormuş gibi görünen, son birkaç yıl içinde öne çıkan iki gerontogen SIRT-1 ve

TOR'dur. Bu iki gerontogen, mayadan tutun memelilere kadar neredeyse bütün canlılarda bulunur ve ikisi de ömür uzunluğu üzerindeki etkilerini bütün proteinleri etkinleştirerek gösterir. İkisi de insülin ailesi gibi besinler ya da büyüme faktörlerinin varlığına ya da yokluğuna duyarlıdır ve karşılıklı koşullarda ikisi de harekete geçer.⁷ TOR'un, hücre büyümesi ve yayılmasını teşvik ederek makasın cinsel kısmını denetlediği sanılıyor. TOR, kendi aralarında protein sentezi ve hücre büyümesini teşvik eden proteinleri etkinleştirirken, bir yandan da hücre bileşenlerinin çözülmesini ve eksilmesini engeller. SIRT-1 ise bunun büyük bölümüne karşı koyar, bir yandan da hücreyi güçlendiren bir "baskı altında kalma tepkisi" geliştirir. Biyolojide görülen tipik bir durum çerçevesinde, bu ikisinin faaliyetleri örtüşmez, ama birbirlerine karşı tam bir dengesizlik de yaratmaz. SIRT-1 ve TOR kendi aralarında, kalori sınırlamasının birçok yararını düzenlemekten sorumlu merkezî "istasyonlar" olarak hareket ederler.

SIRT-1 ve TOR'un öne çıkmalarının nedeni kısmen, kesinlikle önemli olmaları, kısmen de farmakolojik olarak onları nasıl hedef alacağımızı bilmemizdir, bu da söz konusu ödüller dikkate alındığında canlı bir bilimsel tartışmayı beslemiştir. Massachusetts Institute of Technology'de çalışan Leonard Guarante ile bugün Harvard'da çalışan, eskiden Guarante ile doktora sonrası çalışmalar yürütmüş olan ve şimdi Harvard'da bulunan David Sinclair'e göre, SIRT-1 memelilerde kalori sınırlamasının yarattığı etkilerin çoğundan sorumludur ve kırmızı şarapta bulunan, *resveratrol* olarak bilinen küçük bir molekül tarafından harekete geçirilir. *Nature* dergisinde 2003'te yayınlanan bir makale başta olmak üzere, bir dizi üst düzey araştırma *resveratrol*'ün mayanın, solucanların ve sineklerin ömürlerini uzatabileceğini göstermiştir. Kasım 2006'da Sinclair ile meslektaşları *Nature*'da, *resveratrol*'ün obez farelerin ölüm oranını üçte bir oranında azalttığını gösteren, çığır açıcı bir makale yayınladıklarında kamuoyunda bir ilgi patlaması olmuştu; *New York Times*'ın ilk sayfasından yayınlanan bu bulgu büyük bir ilgi uyandırmıştı. *Resveratrol* bunu obez farelerde, aşırı kilolu başka memelilerde yapabiliyor-

sa, insanlar için de harikalar yaratıyor olabilirdi. Kırmızı şarap içmenin sağlık açısından bilinen yararları da bu değirmene su taşıyordu, gerçi bir kadeh şaraptaki resveratrol miktarı farelere verilen dozun sadece yüzde 0,3'ü kadardı.

İroniktir Guarente'nin laboratuvarında çalışan, bugün ikisi de Seattle'da Washington Üniversitesi'nde bulunan iki eski doktora öğrencisi Brian Kennedy ile Matt Kaeberlein son dönemde bu güzel fikre meydan okudular. SIRT-1 üzerinde yapılmış ilk çalışmaların öncülüğünü yapmış olan bu araştırmacılar, öngörülerinin karşısına çıkan birtakım istisnalar yüzünden sıkıntıydı.

Kaeberlein ile Kennedy, SIRT-1 yerine, etkilerinin çok daha nüfuz edici ve tür arasında daha tutarlı olarak gözlemlendiğini söyledikleri TOR'un bayraktarlığını yapıyorlar. SIRT-1 ve TOR tam anlamıyla birbirine karşıt özelliklerden çok, örtüşen özelliklere sahip olduğundan haklı olabilirler. Özellikle de TOR'un bloke edilmesi bağışıklık ve iltihaplanma faaliyetlerini bastırır, bunun yararı olabilir, çünkü yaşa bağlı hastalıkların birçoğunun iltihap yaratan ısrarcı bir bileşeni vardır. Burada da bir ironiyle karşılaşırız, çünkü TOR aslında "*target of rapamycin*"in (rapamisin hedefi) kısaltmasıdır ve organ nakli tıbbi bağlamında keşfedilmiştir. Rapamisin, piyasadaki en başarılı nakil bağışıklık sistemi baskılayıcılarından ve on yılı aşkın bir süredir kullanılmaktadır. Kullanıcıları kanser ya da kemik kaybına açık hale getirmediği için, bağışıklık sistemi baskılayıcıları arasında olağandışı bir yeri vardır; ama Mikhail Blagosklonny'nin rapamisinin ideal bir yaşlanma karşıtı ilaç olduğunu kuvvetle savunması pek az araştırmacıyı ikna etmiştir. Organ nakli geçirip de rapamisin kullananların ileri yaştan kaynaklanan hastalıklara daha az maruz kalıp kalmadıklarını görmek kesinlikle ilginç olacaktır.

Ne var ki yaşlanma karşıtı ilaçlar olarak hem resveratrol hem rapamisinle ilgili daha derin bir sorun vardır, ikisi de bu geniş yelpazede eleştirilere maruz kalmaktadır. Her ikisi de onlarca, hatta yüzlerce protein ve genin etkinleştirilmesini ya da etkisiz hale getirilmesini koordine eder. Bu bir ölçüde gerekli olabilir, ama bu geniş değişiklik yelpazesinin bazı kısımları yararsız ola-

bilir ya da kısa vadeli gıda yoksunluğu ya da stres bağlamında ancak sınırlı düzeyde gerekli olabilir, zaten evrildikleri bağlam da budur. Örneğin SIRT-1'in etkinleştirilmesinin ya da TOR'un baskılanmasının insülin direncine, şeker hastalığına, kısırlığa ya da bağışıklık sisteminin baskılanmasına yol açabileceğini gördük. Daha hedef gözeten bir yaklaşım, muhtemelen pek az değiş tokuş öngöreceğinden, daha tercih edilir olabilir.⁸ Bunun mümkün olması gerektiğini biliyoruz, çünkü yaban hayatta seçim sayesinde kuşak be kuşak ömürlerini uzatan hayvanlar bu geri tepmelerin hiçbirine maruz kalmazlar. Soru şudur: SIRT-1 ve TOR'un uyandırdığı hangi gen kalabalığı ömrün uzamasından ve hastalıkların bastırılmasından sorumludur? Hücrelerde gerçekleşen tam olarak hangi değişiklikler zamanın akışını dondurur? Bu değişiklikleri doğrudan hedefleyebilir miyiz?

Bunun cevabı, genellikle karşılaştığımız üzere, henüz kesin olarak bilinmiyor, araştırmacılar kadar çok sayıda cevap varmış gibi görünüyor. Bazı araştırmacılar "stres karşısında verilen" koruyucu bir cevabı vurgularken, bazıları da zehirli etkileri giderici enzimlerin artmasının altını çiziyor, bazıları da bir atık arıtma sisteminin güçlenmesini vurguluyor. Bunların hepsi de bazı koşullarda pekala önemli olabilir, ama türden türe önemleri farklılık gösteriyormuş gibi görünüyor. Mantarlardan bizler de dahil hayvanlara kadar tutarlılık gösteriyormuş gibi görünen tek değişiklik, hücrenin enerji üretim santralleriyle, mitokondrilerle ilgilidir. Kalori sınırlaması hemen her zaman daha fazla mitokondri yaratır, bunların değişime dirençli zarları vardır, nefes alma sırasında daha az sayıda "serbest radikal" yan ürün sızdırır. Bu değişiklikler tutarlı olmakla kalmaz, yaşlanmada serbest radikallerin rolüyle ilgili yarım asırlık araştırmalarla da gayet güzel örtüşürler.



Serbest radikallerin yaşlanmaya yol açabileceği fikrinin kökleri 1950'lere, petrol sanayiinde serbest radikal kimyasıyla ilgili bir geçmişi olan Denham Harman'ın, bu reaktif (bir elektron kaybetmiş ya da kazanmış) oksijen ya da azot parçacıklarının DNA

ve proteinler gibi kritik biyolojik moleküllere de saldırabileceğini ileri sürdüğü dönemlere dayanır. Harman, nihayetinde bu parçacıkların hücrelerde atık olarak kalabileceğini, bunun da yaşlanma sürecini etkileyeceğini savunuyordu.

Harman'ın bu kavrayışı ilk ortaya attığı zamandan bu yana geçen yarım yüzyıl içinde çok şey değişmiştir; bugün, ilk ortaya konduğu haliyle bu kuramın yanlış olduğunu söylemek de yerinde olur. Ne var ki bu kuramın daha incelikli bir versiyonunun doğru olması muhtemel görünmektedir.

Harman'ın bilmediği ve bilemeyeceği iki şey vardı. Biri serbest radikallerin reaktif olmakla kalmadığı, hücrelerin solumayı iyileştirmek ve bir tehlike sinyali olarak bunları kullandığıydı. Serbest radikaller, dumanın yangın alarmını harekete geçirmesine çok benzer bir şekilde işler. Proteinler ve DNA'ya rastgele saldırarak yerine, sinyal veren kilit önemde birkaç proteini (TOR da dahil) harekete geçirir ya da etkisiz hale getirirler, bu proteinler de yüzlerce protein ve genin faaliyetini düzenler. Serbest radikallerin hücre fizyolojisi açısından temel önemde olduğunu artık biliyoruz, serbest radikalleri silip süpüren antioksidanların da neden yararları kadar zararları olduğunu da böylece görmeye başladık. Birçok araştırmacı, Harman'ın ilk öngörüsünden hareketle antioksidanların yaşlanmayı yavaşlatması ve hastalıklara karşı koruyucu olması gerektiğini düşünüyor hâlâ. Tekrar tekrar gerçekleştirilen klinik araştırmalar antioksidanların işe yaramadığını göstermiştir. Mesele şudur ki antioksidanlar serbest radikallerin sinyalleriyle karışır. Serbest radikallerin sinyallerinin bozulması, yangın alarmının kapatılmasıyla eşdeğerdir. Bunun gerçekleşmesinin önlenmesi için, kandaki antioksidan düzeyleri katı sınırlar dahilinde sıkı sıkıya kontrol altında tutulur. Yüksek dozda antioksidan atılır ya da en başta emilmez. Vücuttaki antioksidan düzeyi kabaca sabit kalır, böylece alarm harekete geçmeye hazır halde tutulur.

25 yıl sonra keşfedileceği için Harman'ın bilmediği ikinci etkense hücrenin ölümünde programlanmıştı. Çoğu hücrede, programlanmış ölümü mitokondriler koordine eder, mitokond-

riler bu sistemin tamamını iki milyar yıl önce ökaryot hücrelere yerleştirmiştir. Hücreleri hayatlarını sonlandırmaya yönelten başlıca sinyallerden biri, mitokondrilerden gelen güçlenmiş bir serbest radikal akışıdır. Bu serbest radikal sinyaline cevaben, hücrenin ölüm aygıtı tökezler ve sessiz sedasız kendisini çerçeveden çıkarır, önceki varoluşuna dair bütün izler silinir. Harman'ın düşündüğü sahte moleküler atık birikiminin aksine, sessiz ölüm makinesi, KGB'nin acımasız etkinliğiyle kanıtları ortadan kaldırmayı sürdürür. Böylece Harman'ın kuramının iki kilit öngörüsünün, yani moleküler hasarın yaşla birlikte birikecek tehlikeli düzeylere ulaştığı ve antioksidanların bu birikimi yavaşlatması, ömrü uzatması gerektiği öngörülerinin yanlış olduğunu görürüz.

Ama, daha açığa çıkarılması gereken birçok ayrıntı olsa da, bu kuramın daha ince bir versiyonunun genel olarak doğru olduğunu düşünmemizi gerektirecek birkaç gerekçe vardır. Hepsinin başında da hemen hemen bütün türlerde serbest radikal akışıyla birlikte ömür uzunluğunun farklılık göstermesi gelir.⁹ Serbest radikallerin akışı ne kadar hızlı olursa, ömür o kadar kısalmır. Genel olarak bakıldığında, serbest radikallerin sızma hızı metabolizmanın hızına bağlıdır, yani hücrelerin oksijen tüketme hızına. Küçük hayvanların metabolizmaları hızlıdır, hücreleri oksijeni olabildiğince hızlı tüketir, dinlenme halindeyken bile kalpleri dakikada yüzlerce kez atar. Böyle hızlı bir soluma söz konusu olduğunda, serbest radikal sızıntısı yüksek oranda olur, ömür uzunluğu da kısa olur. Oysa daha büyük hayvanların metabolizmaları daha yavaştır, kalpleri yavaş atar, serbest radikal sızıntısı da damla damla olur. Daha uzun yaşarlar.

Bu noktada istisnalar gerçekten de kuralı doğrular. Örneğin, birçok kuş, metabolik hızlarına bağlı olarak "yaşamaları gereken"den daha uzun bir ömür sürer. Bir güvercin yaklaşık 35 yıl yaşar, bir fareden on kat daha uzun bir ömür sürer; güvercinler ve farelerin aynı boyutlarda olmasına, metabolizmalarının benzer hızda işlemesine rağmen böyledir bu. Madrid'de Complutense Üniversitesi'nde çalışan İspanyol fizyolog Gustavo Barja,

1990'larda çığır açıcı bir dizi deneyde, bu farklılıkların büyük ölçüde serbest radikal sızıntısıyla açıklanabileceğini göstermiştir. Oksijen tüketimi açısından, kuşlar kendilerine eşdeğer memelilerden yaklaşık olarak on kat *daha az* serbest radikal sızdırır. Aynısı, oransız derecede uzun ömürler süren yarasalar için de büyük ölçüde geçerlidir. Kuşlar gibi yarasaların mitokondrileri de çok daha az serbest radikal sızdırır. Bunun neden böyle olması gerektiği kesin değildir; daha önce yazdığım kitaplarda, gerekenin kaçış gücüyle ilgili olduğunu savunmuştum. Ama sebep ne olursa olsun, şüphe götürmez gerçek şudur ki düşük serbest radikal akışı uzun ömür demektir.

Serbest radikal sızıntısıyla birlikte farklılık gösteren şey sadece ömür uzunluğu değildir, sağlıkta da farklılıklar gözlenir. Yaşa bağlı hastalıkların başlangıcının zamanın akışına değil, biyolojik yaşa bağlı olduğunu belirtmiştik. Fareler ve insanlar aynı hastalıklardan mustarip olurlar, ama farelerde bu hastalıklar birkaç yıl içinde başlar, insanlardaysa hastalıkların görülmesi yıllar alır. Bazı dejeneratif durumlara, hem farelerde hem insanlarda aynı mutasyonlar yol açar, ama hep aynı zaman farklılığını görürüz. Medawar'ın yaşlanmayla ilişkilendirdiği, tıbbi araştırmalar açısından temel önemde olan sapkın genler yaşlı hayvanlarda, bu hayvanların yaşlanmış hücrelerinin halindeki bir şey yüzünden açığa çıkar. Alan Wright ve Edinburgh Üniversitesi'ndeki meslektaşları, bu "bir şey" in serbest radikal sızıntısının hızıyla bağlantılı olduğunu göstermiştir. Serbest radikal sızıntısı hızlıysa, dejeneratif hastalıklar çabucak yerleşir; yavaşsa, bu hastalıklar ertelenir ya da tümüyle ortadan kalkar. Örneğin kuşlar, çoğu memelide (yine yarasalar istisna olmak üzere) ortak olan yaşla bağlantılı hastalıkların pek azına maruz kalırlar. Makul bir varsayıma göre, serbest radikal sızıntısı nihayetinde hücrelerin durumunu değiştirir, onları "yaşlı" yapar, bu değişmiş hal de geç harekete geçen genlerin olumsuz etkilerini ortaya çıkarır.

Serbest radikaller yaşlanma sırasında hücrelerin durumunu nasıl değiştirir? Bunun sinyal verme üzerindeki amaçlanmamış etkiler sayesinde gerçekleştiği neredeyse kesindir. Serbest radi-

kal sinyallerinin kullanılması, gençliğimizde sağlığımızı iyileştirir, ama yaşlandığımızda yıkıcı etkiler yaratır (GC Williams'ın *antagonistik pleiotropi* kuramında olduğu gibi). Hücrelerin mitokondri nüfusları yıpranmaya başladığında, serbest radikal sızıntısı hafifçe de olsa kendisini göstermeye başlar, böylece yangın alarmını harekete geçiren bir eşige ulaşınca kadar devam eder, sürekli. Yüzlerce gen normal hale dönülmesi yönünde nafile bir çabayla makas değiştirir, yaşlılıktaki birçok hastalığın özelliği olan, ılımlı da olsa kronik bir iltihaplanmaya neden olur.¹⁰ Bu ısrarlı ılımlı iltihaplanma başka birçok protein ve genin özelliklerini değiştirir, hücreyi daha büyük bir baskı altına sokar. Sanıyorum, *ApoE4* gibi geç harekete geçen genlerin yıkıcı etkilerini ortaya çıkaran şey bu iltihaplanma öncesi haldir.

Buradan iki çıkış yolu vardır. Hücreler ya kronik olarak baskılı bir hale ayak uydururlar ya da uyduramazlar. Farklı hücre tipleri, büyük ölçüde "görevleri"ne bağlı olarak ayak uydurma becerileri açısından farklılıklar gösterir. Benim bildiğim en iyi örnek, Londra'da University College'da çalışan öncü farmakolog Salvador Moncada'nın çalışmalarında yatıyor. Moncada, nöronlar ile astrosit olarak bilinen, onları destekleyen hücrelerin akıbetlerinin taban tabana zıt olduğunu göstermiştir. Nöronlar mitokondrilerine dayanır, mitokondrilerle ihtiyaçlarını karşılayacak kadar enerji üretemezlerse, hücrenin ölüm aygıtı tetiklenir ve nöron sessizce ortadan kaldırılır. Alzheimer hastalığının ilk semptomları belirgin bir hal aldığı anda, beyin dörtte bir kadar küçülür. Oysa tersine, astrositler mitokondiler olmadan da hayatta kalabilir. Alternatif enerji kaynaklarına geçerler (*glikolitik değişim*) ve programlanmış hücre-ölümüne karşı neredeyse bağışıklık kazanırlar. Birbirine karşıt bu iki sonuç, hem dejenerasyon hem kanserin neden yaşlanmayla el ele gittiğini açıklar. Hücreler alternatif enerji kaynaklarına geçemezlerse ölürlər, bu da dokular ve organların küçülmesi, geride kalan pek az hücreye çok daha fazla sorumluluk yüklenmesiyle birlikte dejeneratif hastalıklara yol açar. Öte yandan, makas değiştirebilen hücreler böyle yapar ve hücresele ölüme neredeyse bağışık hale gelir. Hiç

dinmeyen iltihaplanma koşullarının güdümü altında yayılırlar, kendilerini hücresel döngünün normal kısıtlamalarından bağımsız kılan mutasyonları hızla biriktirirler. Kanser hücrelerine dönüşürler. Nöronların nadiren tümör oluşturmaları, oysa astrositlerin nispeten yaygın işbirlikçiler olmaları bir sürpriz değildir.¹¹

Bu bakış açısıyla yaklaştığımızda, kalori sınırlamasının neden yaşlılığın yanı sıra, yaşa bağlı hastalıklara karşı da koruma oluşturduğunu görebiliriz, en azından hayata erken başlamışlarsa (mitokondriler yıpranmadan önce, orta yaş iyidir). Kalori sınırlaması serbest radikal sızıntısını azaltarak, mitokondrilerin zararlarını hasara karşı güçlendirerek ve mitokondri sayısını artırarak hayat saatini “gençliğe” doğru yeniden kurar. Bunu yaparken de yüzlerce iltihaplandıcı geni kapatır, genleri gençlik dolu kimyasal ortamlarına geri döndürür, bu arada hücreleri programlanmış hücre ölümüne karşı güçlendirir. Bu bileşim hem kanseri hem dejeneratif hastalıkları bastırır ve yaşlanma hızını yavaşlatır. Pratikte çok çeşitli başka etkenlerin de işin içine dahil olması muhtemeldir (baskılayıcı TOR’un doğrudan bağışıklık sistemini baskılayan etkileri gibi), ama prensipte kalori kısıtlamasının çoğu yararı serbest radikal sızıntısındaki bir azalmayla açıklanabilir. Bu azalma bizi daha çok kuşlara benzetir.

İşlerin gerçekten de bu şekilde gittiğini gösteren bir kanıt parçası mevcut. 1998’de Masashi Tanaka ile o sıralarda Japonya’da Gifu Uluslararası Biyoteknoloji Enstitüsü’nde çalışmakta olan meslektaşları, mitokondrisel DNA’larında ortak (maalesef dünyanın başka yerlerinde değilse bile en azından Japonya’da ortak) bir varyant bulunan insanların akıbetini incelemişti. Bu varyant tek bir DNA harfini değiştirir. Bu değişimin etkisi serbest radikal akışında küçük, herhangi bir anda tespit edilmesi güç olan, ama ömür boyu devam eden bir azalma olarak kendisini gösterir. Ne var ki sonuçları muazzamdır. Tanaka ile meslektaşları hastaneye gelen birkaç yüz hastanın mitokondrisel DNA’larının dizilimini çıkarmış ve yaklaşık olarak 50 yaşına kadar bu iki tipin, söz konusu varyantla “normal” tipin oranları arasında hiçbir farklılık görülmediğini göstermiştir. Ama 50 yaşından sonra iki grup ara-

sında bir uçurum açılmaya başlıyordu. 80 yaşına gelindiğinde, bu varyantın bulunduğu insanların herhangi bir sebepten hastaneye gelme olasılıkları yarı yarıya azalmış oluyordu. Hastaneye gelmemelerinin sebebi de ölmüş olmaları falan değildi. Tanaka, bu varyantın bulunduğu insanların 100 yaşına kadar gelme olasılıklarının iki kat fazla olduğunu görmüştü. Bu demektir ki bu varyantın bulunduğu insanların yaşa bağlı hastalıklara maruz kalma ihtimalleri yarı yarıya azdır. Bir daha tekrarlayayım, çünkü bütün tıp alanında bundan daha sarsıcı bir olgu daha bilmiyorum: Mitokondrilerdeki küçük bir değişiklik, yaşa bağlı hastalıklar nedeniyle hastanelik olma riskimizi yarı yarıya azaltır ve 100 yaşına kadar gelme ihtimalimizi iki kat artırır. Grileşen gezegenimizde yaşlılığa özgü sıkıntı verici, insanın kolunu kanadını kırarak kadar pahalı sağlık sorunlarını halletme konusunda ciddiyesek, hiç kuşku yok ki başlangıç noktası burasıdır. Çatıların tepesinden haykırılım bunu!



Önümüzde duran bilimsel güçlükleri küçümsemek ya da meslek hayatlarını yaşlılığa özgü belli hastalıkların ayrıntılarına adanmış olan araştırmacıların çabalarını küçültmek istemiyorum. Onların, hastalıkların genetiğini ve biyokimyasını aydınlatma yönündeki kahramanca başarıları olmasaydı, daha kapsamlı bir senteze ulaşmak mümkün olmazdı. Yine de tıp araştırmacılarının ya evrimci düşünceden habersiz olmaları ya da buna ilgi duymamaları gibi bir tehlike mevcuttur. Evrimci düşünür Theodore Dhobzhansky'nin savunduğu üzere, biyolojide hiçbir şey evrimin ışığı dışında başka bir şeyle anlamlandırılmıyorsa, tıpta durum daha da kötüdür, hastalıklarla ilgili modern bakış açısının hiçbir anlamı yoktur. Her şeyin bedelini biliyoruz, ama değerini bilmiyoruz. Benim büyükbabalarımın acılara katlanan stoacı kuşağı kendilerini, bu şeylerin bizleri sınamak için gönderildiğini söyleyerek teselli ederdi, ama bu kadercilik yatakların başucundan silineli beri hastalıklar öylece oluveriyor, hayatları mahşerin dört atısını utandıracak derecede karartıveriyor. Şim-

di artık kansere ya da Alzheimer'a karşı bir "savaş" söz konusu, bir gün kaybedeceğimizi bildiğimiz bir savaş.

Ama hayat da ölüm de rastgele değil. Bir anlamları var, bu anlamı kendimizi iyileştirmek için kullanabiliriz. Ölüm evrildi. Yaşlanma evrildi. Pragmatik gerekçelerle evrildiler. En geniş kapsamlı çerçevede düşünecek olursak, yaşlanma esnektir, hayatın envanter defterinde cinsel olgunlaşma gibi çok çeşitli başka etkenlere karşı kurulmuş evrimsel bir değişkendir. Bu parametreleri kurcalamanın cezası vardır, ama bu cezalar farklılık gösterir, en azından birkaç örnekte önemsiz olabilir. İlkesel olarak belli yollarda yapılacak küçük değişiklikler daha uzun, sağlıklı hayatlar yaşamamızı sağlayabilir. Şunu daha kuvvetli bir biçimde vurgulayayım: Evrim kuramı, iyi karara bağlanmış tek bir ilaçla yaşlılığa bağlı hastalıkları silebileceğimizi ileri sürer. Yaşlanma karşıtı haplar mit değildir.

Ama Alzheimer hastalığına karşı bir "deva"nın bir mit olduğundan yana kuşkularım var. Aslına bakarsanız, tıp araştırmacıları "deva" sözcüğünü pek sevmez, "iyileştirme", "hafifletme" ya da "erteleme" gibi daha dikkatli sözcükler tercih ederler. Aslında "yaşlı" olan hastalarda Alzheimer'ı iyileştirip iyileştiremeyeceğimizden yana kuşkularım var, çünkü evrimci anlayışın koşullarını unutuyoruz. Sızdıran bir barajdaki çatlakların birkaçını macunla sıvamaya, sonra da akıntının kesilmesini ummaya benziyor bu. Aynı şey büyük ölçüde kalp krizi, kalp hastalıkları, birçok kanser biçimi vs. için de geçerlidir. İnanılmaz miktarda ayrıntı ortaya çıkardık. Proteinden proteine, genden gene neler olup bittiğini biliyoruz, ama yine de ağaçlara bakarken ormanı gözden kaçırıyoruz. Bu gibi hastalıklar yaşlanmış bedenlerin başına geliyor, bunlar yaşlanmış bir iç ortamın ürünleri; hayatın erken bir döneminde müdahale edebilirsek, o ortamı "gençliğe" ya da en azından "daha genç dönemlere" çevirebiliriz. Bu doğrudan, kolayca olabilecek bir şey değil, bunun için çok ayrıntılı anlaşmalar, çok fazla pazarlık gerekiyor. Ama tıbbi araştırmalara ayrılan zamanın ve çabanın bir bölümünü, yaşlanmanın ardındaki mekanizmaları anlamaya harcarsak, gelecek yirmi yıl içinde

bir cevaba ulaşmamamıza şaşarım. Yaşlılıktaki bütün hastalıkları bir kalemde tedavi eden bir cevaba.

Bazı insanlar ömrü uzatmanın etiğiyle ilgili kaygılar duyacaktır, ama ben bunun ille de bir sorun olacağını sanmıyorum. Örneğin, kalori sınırlamasının uzun ömürlülük payı, açıkça ömrü kısaltır. Fareler ömürlerini yaklaşık iki katına çıkarırken, aynı uzatma alyanaklı maymunlarda görülmez. Maymunlarla ilgili araştırmalar henüz tamamlanmamıştır, ama ömür uzunluğu açısından yararların ılımlı düzeyde kalması muhtemeldir. Ama sağlık açısından yararlar ayrı bir mesele olacaktır. Alyanaklı maymunlardaki biyokimyasal değişiklikler, yaşlı maymunların yaşlılığa özgü hastalıklara daha az maruz kaldığını gösterir, ömürleri büyük ölçüde uzamasa bile. Benim sezgilerim, sağlıklı yaşam süresini uzatmanın ömrü uzatmaktan kolay olacağını söylüyor. Kalori sınırlamasının yararlarını taklit edebilen, ama geri tepmelerinden kaçınan yaşlanma karşıtı bir hap icat edebilirsek, sağlıkta genel bir iyileşme görmemiz, yüz yaşını devirmiş daha sağlıklı birçok kişiyle (mitokondri varyantına sahip şanslı Japonlara benzer bir şey) karşılaşmamız mümkün olabilir, ama 1000, hadi ondan geçtim 200 yaşına kadar gelebilen birini göreceğimizi sanmıyorum. Üstlenmeyi kabul etseydik, daha çetin bir iş olurdu bu.¹²

Büyük ihtimalle sonsuza kadar yaşayamayacağız, zaten birçoğumuz da bunu istemez. Sorun ilk kolonilerin oluşmasında, cinsiyet hücreleriyle beden arasındaki ayrımdaya yatıyor. Hücreler farklılaşmaya başladıklarında, kullanılıp atılabilir soma, mikrop hattına bağımlı hale gelmeye başlamıştır. Hücreler uzmanlaştıkça, genel olarak bedende, özel olarak da mikrop hattında görülen yararlar daha fazla olmuştur. En fazla uzmanlaşmış hücreler, insan beynindeki nöronlardır. Daha sıradan hücrelerin tersine, pratikte nöronların yeri doldurulamaz, her biri en az 10.000 sinaptik bağlantı içinde yer alır, her sinaps da kendi benzersiz deneyimimizle kurulur. Beyinlerimizin yeri doldurulamaz. Nöronlarımız öldüğünde genelde onların yerini alacak bir kök hücre havuzu yoktur, bir gün bir nöronsal kök hücre havuzu yaratma-

yı başarır sak, hiç kuşkusuz bu pazarlığa kendi deneyimimizi de koymamız gerekecektir. İşte bu yüzden de ölümsüzlüğün bedeli insanlığımızdır.

Sonsöz



TV'de yayınlanan en güçlü sahnelerden birinde Jacob Bronowski kendi ailesinin bazı mensupları da dahil olmak üzere dört milyon insanın küllerinin atıldığı Auschwitz bataklıklarında yürüyor, konuşabileceği yegane biçimde kameraya konuşuyordu. Bilim diyordu, insanları gayri insanileştirip onları rakamlara çevirmez. Auschwitz bunu yaptı. Gazla değil, küstahlıkla, dogmayla. Cehaletle. İnsanlar tanrıların bilgisine erişmek isteyip de gerçeklikle sınanmadıklarında böyle olur.

Oysa tersine bilim, çok insani bir bilgi biçimidir. Bronowski çok güzel söylüyordu: "Her zaman bilinenin eşiğindeyiz; her zaman ümit edilmesi gerekene doğru gittiğimizi hissederiz. Bilimdeki her yargı hatanın eşiğinde durur ve kişiseldir. Bilim, yanılabilir olsak da bilebilecek olduğumuza bir övgüdür."

The Ascent of Man'deki bu sahne 1973'te gösterilmişti. Bronowski ertesi yıl kalp krizinden öldü, bilimin kendisi kadar insani bir yanılabilirlikle. Ama onun verdiği esin yaşıyor, bilimin ruhunun bundan daha iyi bir tezahürünü daha bilmiyorum. Bu ruhla, dolaylı bir vefa borcunu ödeyen bir başlıkla bu kitap da bilinenin eşiğinde yürüdü. Hatanın eşiğinde duran yargılarla dolu bir kitap bu. Yanılabilir olsak da bilebilecek olduklarımıza bir övgü.

Peki ama yanılğı ile hakikat arasındaki sınır nereden geçiyor? Bazı bilim insanları bu kitaptaki ayrıntılarla hemfikir olmayabilir, bazıları olabilir. Fikir uyuşmazlıkları hatanın eşiğinde ortaya çıkar, eşikten düşmek de kolaydır. Ama ayrıntılar değişiyorsa

ya da hatalıysa, bütün bunlar daha geniş kapsamlı hikayeyi de yanlış kılar mı? Bilimsel bilgi, özellikle derin geçmişe uygulandığında görelidir. Bu durumda, dogmanın rahatlığını tercih edenlerin her gün yaptığı gibi ona meydan okunabilir mi? Yoksa evrim bilimi meydan okumaları kabul etmeye yanaşmayan bir başka dogma mıdır?

Sanıyorum bu sorunun cevabı, kanıtların aynı anda hem yanılabilir hem de ezici ağırlıkta olması. Geçmiş hiçbir zaman bütün ayrıntılarıyla bilemeyiz, çünkü yorumlarımız her zaman yanılabilir, her zaman bir okumadan daha fazlasına açıktır. Bilimin bu kadar tartışmalı bir hal alabilmesinin nedeni budur. Ama bilimin deneyler ve gözlemlerle, gerçeklikteki sınamalarla hesapları düzeltme konusunda benzersiz bir gücü vardır, sayılamayacak kadar çok ayrıntı, sayılamayacak kadar çok pikselin mesafenin doğru olması koşuluyla inandırıcı bir tablo çizmesi gibi daha büyük bir şeyi ortaya çıkarır. Bu kitapta betimlenmiş bazı ayrıntıların hatalı olduğu anlaşılacak olsa bile hayatın evrildiğinden kuşku duymak moleküllerden insanlara, bakterilerden gezegen sistemlerine varıncaya dek kanıtların bir araya gelmesinden kuşku duymak demektir. Biyolojinin kanıtlarından, biyolojinin fizik, kimya, jeoloji ve astronomiyle uyumundan kuşku duymak demektir. Deneyler ve gözlemlerin doğruluğundan, gerçekliğin sınanmasından kuşku duymak demektir. Nihayetinde gerçeklikten kuşku duymak demektir.

Ben bu kitapta çizilen tablonun doğru olduğunu düşünüyorum. Hayat, burada betimlenen çizgi doğrultusunda evrilmiştir, ona neredeyse hiç şüphe yoktur. Bu bir dogma değildir, gerçeklikle sınanan, gereği gibi düzeltilen kanıtlar bütünüdür. Bu büyük tablo Tanrı'ya inançla uyuşur mu uyuşmaz mı bilemiyorum. Evrimle yakından tanışık olan bazılarına göre uyuşur, bazılarına göre uyuşmaz. Ama inançlarımız ne olursa olsun bu anlayış zenginliği, bir hayret etme ve kutlama nedeni olmalıdır. Uzayın kasvetli sonsuzluğunda yüzen bu mavi-yeşil bilyede, etrafımızdaki hayatla bu kadar fazla ortak yönümüzün olması muhteşem bir şey. Hayata bu bakışta heybetten fazlası var. Yanılabilirlik ve görkem, insanın bilme açlığı var.

Notlar



BİRİNCİ BÖLÜM

1. Özelde bu, elektronların bir vericiden (hidrojen) bir alıcıya (oksijen) aktarıldığı bir redoks tepkimesidir; alıcı, termodinamik bakımdan kararlı bir ürün olan su oluşturmak için daha fazla elektron ister. Bütün redoks tepkimeleri bir vericiden bir alıcıya elektron transferini gerektirir, dikkat çekicidir ki bakterilerden insanlara kadar hayatın tamamı enerji için şu ya da bu tip elektron transferlerine dayanır. Nobel Ödülü sahibi Macar Albert Szent-György'nin dediği gibi, "Hayat, kalacak bir yer arayan bir elektrondan başka bir şey değildir."
2. Bu ifadenin kesinkes doğru olduğu söylenemez. Menfezler solgun bir ışık salar (yedinci bölümde tartışılıyor), insan gözünüle fark edilemeyecek kadar solgun olan bu ışık, bazı bakterilerde fotosenteze güç verecek kadar kuvvetlidir. Ama sülfür bakterileriyle kıyaslandığında, bütün bunlar ekosistemdeki bolluğa çok az katkıda bulunur. Tesadüfe bakın ki okyanus tabanında bu menfezlerdeki gibi hayat dolu faunanın büyük bölümünün bulunduğu soğuk-sızıntı bölgelerinin keşfedilmesi, ısı ve ışığın konu dışı olduğunu doğrulamıştır.
3. Diğer problemler arasında şunlar yer alır: Isı (bazıları organik moleküllerin hayatta kalamayacağı kadar sıcak olduğunu söyler); asitlilik (çoğu siyah baca Wächtershäuser'in ileri sürdüğü kimyayı destekleyemeyecek kadar asitlidir, Wächtershäuser'in laboratuvar sentezleri de sadece baz ortamlarda işlemiştir); sülfür (modern biyokimyaya nispetle çok fazladır). Bütün bu meseleler tartışmalıdır, bu yüzden de daha fazla tartışmayacağım.
4. Gezegenin çekirdeğinin soğumasının uzun vadedeki sonuçları-

la ilgili ilginç bir soru söz konusudur. Manto soğurken deniz suyu, ısıyla geri çekilmek ve volkanik faaliyetler sonucu yüzeye çıkmak yerine kayaları bağlama ve onların yapısının bir parçası olarak kalma eğilimi gösterir. Soğuyan bir gezegen nihayetinde okyanuslarını bu şekilde tüketebilir, Mars'ta okyanusların kaybına böyle bir süreç yol açmış olabilir.

5. Bir çekirdekten yoksun olan basit prokaryot hücrelerin yer aldığı iki alem vardır: bakteriler ve arkeler. Kayıp Şehir'in asıl sakinleri enerjilerini metan üretiminden sağlayan arke bakterilerdir. Arkelerin bitkiler ve hayvanları oluşturan karmaşık ökaryot hücrelere nazaran çok farklı bir biyokimyası vardır. Şimdiye kadar arkeler içinden türemiş bilinen bir patojen ya da parazit yoktur, patojen ya da parazitlerin hepsi de ev sahibi hücreleriyle biyokimyasal olarak daha fazla ortak olan bakterilerdir. Belki de arkeler bu kadar farklıdır. Bir istisna, iki milyar yıl önce ökaryot hücreyi doğuran bir arke ile bir bakteri arasındaki ortaklık olabilir. Bkz. dördüncü bölüm.
6. Sirkenin kimyadaki ismi asetik asit ya da asetattır, "asetil" kökünü oluşturur; bir tiyoesterde bu iki karbonlu molekül reaktif bir sülfür grubuna bağlanır.
7. *Chemiosmosis*'in tuhaflığı ve kozmik önemiyle birlikte hikayenin tamamını dinlemek isteyenler bundan önceki kitabım *Power, Sex, Suicide: Mitochondria and the Meaning of Life*'a başvurabilir.

İKİNCİ BÖLÜM

1. Bu kadar fazla yeni mutasyonla birlikte, neden hepimizin mutasyonel bir erime geçirmediğimizi merak ediyor olabilirsiniz, aynı soru birçok biyoloğun başına da dert olmaktadır. Cevap tek kelimeyle "seks"tir, ama açıklama beşinci bölümde.
2. Bu rakam DNA diziliminin benzerliğini ifade eder. Şempanzeler ve insanların ayrılmasından bu yana eksilmeler ya da kromozom füzyonları gibi daha büyük başka genomik değişiklikler de meydana gelmiş, böylece genelde yüzde 95'e yakın bir genom benzerliği yakalanmıştır. Bir karşılaştırma yapılırsa, insan nüfusları arasındaki genetik farklılıklar küçüktür, bizler yüzde 99,9 oranında genetik olarak benzeriz. Böyle kısıtlı bir varyasyon nispeten yakın dönemdeki, belki 150.000 yıl önceki bir nüfus "darboğazı"nı yansıtır, bu "darboğaz" sırasında Afrika'daki küçük bir nüfus, bu kıttan peş peşe çıkan göç dalgalarıyla modern insan ırklarını doğurmuştur.

3. DNA'daki T'nin (timin) yerini RNA'da urasil (U) denilen başka bir baz alır. Bu, RNA ile DNA'nın yapıları arasındaki sadece iki küçük farklılıktan biridir, diğer fark ise DNA'da deoksiriboz yerine riboz denilen bir şekerin kullanılmasıdır. Bu iki küçük kimyasal ayrıntının ne kadar büyük işlevsel farklılıklar yarattığını daha sonra göreceğiz.
4. Peki doğa, çerçeve okuma probleminden nasıl kaçınır? Basit: Baştan başlar ve mRNA'nın sonunda okumayı bitirir. tRNA'ların annelerinin memelerine yapışmış domuz yavrucukları gibi sıralandığı sürecin tersine, bu süreç çarpıcı derecede mekaniktir. mRNA bir ribozom boyunca bir ses bandı gibi beslenir, ribozom bir bant okuyucusu gibi işler, her kodonu sonuna gelinceye kadar sırayla okur. Bitirdiğinde, proteinin tamamı sıkıştırılmak yerine parça parça uzatılır, sonunda ribozom sona vardığında protein salınır. Birkaç ribozom aynı anda aynı mRNA şeridi üzerinde işlerini yapabilir, her biri ilerledikçe yeni bir protein yapar.
5. Burada bizi isimler değil, ifade ettikleri şeyler ilgilendiriyor: Kodun ilk harfi C ise, şifrelenen amino asit α -ketoglütaratтан gelmiştir; A'ysa, amino asit oksaloasetattan türemiştir; T'yse, pirüvatтан. Son olarak, ilk harf G'yse, amino asit tek bir eşdeğer adımda herhangi bir sayıda basit öncülerden oluşmuştur.
6. Amino asidin RNA'ya transferinin RNA dizilimine dayanması mümkündür. Colorado Üniversitesi'nde Michael Yarus ile meslektaşları çok sayıda kodon karşısı dizilim içeren küçük RNA moleküllerinin başka amino asitlere kıyasla milyon kat yakınlıkla "doğru" amino asidi bağladıklarını göstermiştir.
7. Laboratuvarında bir enzime de gerek vardır, bir DNA polimerasına. Menfezlerde RNA ya da DNA kopyalanmasını teşvik etmek için bir enzime gerek olması da muhtemeldir, ama bu enzimin bir protein olması gerektiğini söyleyen bir şey yoktur. Bir RNA kopyası da o kadar iyi iş görebilir, mevcudiyeti muhtemel görünmekle birlikte, bu da biraz kutsal kase hâline gelmiştir.
8. Bizim (ökaryotik) DNA kopyalama yöntemimiz dördüncü bölümde inceleyeceğimiz gerekçelerle bakterilerden değil, arkelerden alınmıştır.
9. Watson ve Crick şu gözlemde bulunmuşlardı: "Bu yapının (ikili sarmal) deoksiriboz yerine bir riboz şekeriyle inşa edilmesi muhtemelen imkansızdır, çünkü fazladan oksijen atomu çok yakından bir van der Waals temasına neden olur."

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

1. Atmosferde, karbondioksitten yaklaşık 550 kat daha fazla oksijen bulunur, aşıkardır ki bu durum karbondioksit seviyelerinin iki ya da üç katına çıkmasını daha kolaylaştırır. Ne var ki atmosferdeki oksijen seviyesi çok değişmemiş olsa da, ısının artması oksijenin sudaki çözünürlüğünü azaltır. Balık nüfusları, okyanuslarda çözünen oksijen düzeyinin az olmasından etkilenmektedir. Örneğin, Kuzey Denizi'ndeki tatlı su gelinciği (*eelpout*) nüfusu, çözülmüş oksijen yoğunluğundaki farklılıklar yüzünden değişmektedir, oksijen ne kadar az olursa, nüfus da o kadar küçük olmaktadır.
2. Oksijenin evrimdeki rolüyle ilgili daha fazla bilgi edinmek için, daha önceki kitabım *Oxygen: The Molecule that Made the World'e* bakınız.
3. Bu konuda daha fazla bilgi edinmek isterseniz, Oliver Morton'un *Eating the Sun* adlı kitabını gönülden önerebilirim.
4. T. H. Huxley, *Türlerin Kökeni*'ni okuduktan sonra, "Bunu düşünmemiş olmak ne büyük aptallık!" demişti.
5. Elektromanyetik tayfta, enerji ve dalga boyu arasında ters bir ilişki vardır: dalga boyu ne kadar düşük olursa enerji o kadar yüksek olur. Klorofil tayfin görünür kısmında ışık emer, özellikle de kırmızı ışığı emer. Klorofilin güçlü oksidan biçimi P680 olarak bilinir, zira 680 nm dalga boyundaki ışığı emer. Bitki klorofillerinin diğer biçimleri biraz daha az enerjik, 700 nm dalga boyunda ışık emerler. Fotosentez için mavi ve sarı ışığa hiç gerek yoktur, bu yüzden bu ışıklar geri yansıtılır (ya da geçirilir), bitkileri yeşil görmemizin sebebi budur.
6. Biyokimyanın adının nasıl kötüye çıktığını merak edenlere: NADPH, nikotinamid adenin dinükleotidin kısaltılmış biçimidir. Güçlü bir "indirgeyici"dir, yani elektronları kuvvetle iter.
7. Teknik olarak konuşursak, bunların adı bakterilerde fotosistemler değil, fotosentetik birimlerdir. Gelgelelim, bakteriyel tepkime merkezleri bitkiye hem yapısal hem işlevsel olarak tamı tamına delalet eder. Bu nedenle ben de aynı terime bağlı kalacağım.
8. Porfiri aslında, deri ve organlarda biriken porfirinlerin yol açtığı bir hastalıklar grubudur. Çoğu biçimi iyi huyludur, ama bazen biriken porfirinler ışıkla etkinleşir ve çok rahatsız edici yanmalara neden olur. Bu hastalığın en kötü biçimleri, örneğin kronik eritropoyetik porfiri o kadar yıkıcıdır ki burun ve kulaklar eriyip

gidebilir, dişetleri aşınıp dişleri öylece çıkıntı gibi ortada bırakabilir, yüzde yaralı dokular ve kollar çıkabilir. Bazı biyokimyagerler bu durumları vampirler ve kurt adamlarla ilgili halk efsaneleriyle ilişkilendirmiş, hastalığın ılımlı biçimlerini yaşayan, zaten başa çıkmaları gereken o kadar şey varken, bir de sıradışı damgasını yediklerini düşünen insanların öfkesini çekmiştir. Aslında porfirinin en kötü biçimlerine bugünlerde nadiren rastlanıyor, zira tedbirler ve daha iyi tedavi biçimleri çok çirkin rahatsızlıkların ortaya çıkmasını sınırlamış durumda. Daha da olumlusu, ışığa duyarlı porfirinlerin yakıcı özellikleri kanser tedavisi olarak iyi bir kullanım alanı bulmuş durumda, fotodinamik terapi denilen bu tedavide ışık, tümörü hedefleyen porfirinleri etkin hale getirmek için kullanılır.

9. John Allen'a göre iki fotosistem, siyanobakterilerin bir atasında farklı kullanım alanları yüzünden farklılaşmıştır; bazıları da iki fotosistemin tümüyle farklı bakteri soylarında farklılaştığını, daha sonra bir tür gen füzyonuyla bir araya getirildiğini, kendisi de modern siyanobakterilerin atası olan genetik bir kimera oluşturduğunu savunur. Yakın dönemde ortaya konan kanıtlar Allen'ın görüşünü doğrulamaktadır (fotosistemlerin siyanobakterilerden diğer soylara geçtiğini, aksinin söz konusu olmadığını ileri sürmektedir) ama şimdilik genetik kanıtlar belirsizdir. Gelgelelim hangi varsayım geçerli olursa olsun, fotosistemlerin başlangıçta bağımsız olarak işliyor olması gerekmektedir.
10. Jim Barber'a göre, bu tam da oksijen evriltme kompleksinin bugünkü oluşma biçimidir. Bu kompleks Fotosistem II'den çıkarılırsa ve "boş" fotosistem mangan ve kalsiyum iyonları içeren bir solüsyona yerleştirilirse, bir dizi ışık huzmesi kompleksi yeniden oluşturabilir. Her huzme bir mangan ve oksitler, oksitlenen mangan yerine bağlanır. Beş ya da altı huzme sonra, bütün mangan ve kalsiyum iyonları yerli yerindedir, oksijen evriltme kompleksini yeniden oluştururlar. Başka bir deyişle, doğru protein bağlamı söz konusu olursa, oksijen evriltme kompleksi kendiliğinden toplanır.

DÖRDÜNCÜ BÖLÜM

1. Siz bu satırları okuduğunuz sırada, Windows XP Windows 286 kadar anlamsız geliyor olabilir. O da kaybolup gidecek, hiç kuşkusuz daha sofistike (istikrarsız ve virüslere açık olsa da) bir sisteme yerini bırakacak.

2. Bu, bakterisel bir eşdeğer olmadığını söylemek anlamına gelmiyor. Örneğin, bakterisel hücre iskeleti ökaryot hücre iskeletiyle açıkça ilişkili proteinlerden oluşur, çünkü ikisinin fiziksel yapıları o kadar benzer ki uzayda üst üste bindirilebilirler. Böyle bile olsa, gen dizilimleri birbirinden o kadar farklılaşmıştır ki bütün bu benzerlik ortadan kaybolmuştur. Sırf gen dizilimine dayanarak bir yargıda bulunulursa, hücre iskeleti proteinleri benzersiz derecede ökaryot görülebilir.
3. Woese, ribozomal RNA ağacının "kanonik" olduğunu, çünkü küçük birim altı ribozomal RNA'nın yavaş evrilmekle kalmayıp yanal gen transferiyle hiç değiş tokuş edilmediğini, sadece dikey olarak miras alındığını, yani ana hücreden yavru hücreye geçtiğini söyler. Ama bu tam olarak doğru değildir; *Neisseria gonorrhoea* gibi bakteriler arasında, ribozomal RNA geninin yanal aktarımının bilinen örnekleri mevcuttur. Evrim süreci boyunca bunun ne kadar yaygın olduğu bir başka sorudur, birçok genin kullanıldığı daha sofistike "konsensüs" ağaçlarıyla cevaplanabilecek bir soru.
4. Bu, kimlikle ilgili eski felsefi esprinin hücresel versiyonudur: Beynimizin hafıza hariç bütün parçalarını değiştirmiş olsaydık, "benlik" duygumuzu korur muyduk? Hafızam başka birine nakledilse, o kişi benim kişiliğime sahip olur mu? Bir kişi gibi bir hücre de hiç kuşkusuz parçaların bir toplamıdır.
5. Evrim elbette ki her ikisine de yapar, burada bir çelişki yoktur; aradaki farklılık, değişim hızının kuşaklarla mı yoksa jeolojik çağlarla mı ölçüldüğüne bakar. Çoğu mutasyon hasar vericidir ve doğal seçimle bertaraf edilir, çevredeki değişiklikler (örneğin kitlesel tükenişler) statükoyu değiştirmedikçe, her şey aynı kalır. Değişim jeolojik zaman bakımından da hızlı olabilir, ama yine de genler düzeyinde aynı süreçler aracılığıyla işler ve bir kuşaktan diğerine değişim açısından yine de yavaştır. Felaketlerin mi yoksa yavaş değişimlerin mi vurgulandığı, büyük ölçüde mizaca, bilim insanlarının devrim diye bağırmaya kendilerini kaptırıp kaptırmadıklarına bağlıdır!
6. Bill Martin ve Miklós Müller'in "hidrojen hipotezi", bu ilişkinin, hidrojen ve karbondioksitle büyüyen bir arke ile oksijen soluma ya da fermentasyonla, koşullar gereği hidrojen ve karbondioksit üretme yetisine sahip bir bakteri arasında olduğunu koyutlar. Bu becerikli bakteri büyük ihtimalle, arkenin atık bir ürün olarak saldıgı metanı kullanacaktır. Ama burada bu fikri daha fazla tar-

tışmayacağım, çünkü daha önceki kitabım *Power, Sex, Suicide: Mitochondria and the Meaning of Life*'ta (OUP, 2005) uzun uzadıya tartıştım. Bundan sonraki birkaç sayfada tartışılan fikirler, o kitapta daha ayrıntılı olarak geliştirilmiştir.

7. Teknik olarak, yüzey alanının hacme oranı, boyutların büyümesiyle birlikte düşer, çünkü yüzey alanı kare olarak artar, hacim de küp olarak. Çizgisel boyutların iki katına çıkarılması, yüzey alanını dört kat daha büyütür ($2 \times 2 = 4$), ama hacmi sekiz kat ($2 \times 2 \times 2 = 8$) artırır. Sonuçta, bakteriler büyüdükçe enerji verimliliği kaybolur; enerji üretmekte kullanılan zar, hücrenin hacmine nazaran küçülür.
8. Bu meseleyi, dünyanın dört bir yanında düzenlediğim konferanslarda savundum, henüz “öldürücü” bir eleştiriyle karşılaşmadım. Öldürücü olmaya en yaklaşan eleştiri, bugün mitokondriler olmaksızın fagositoz yapan birkaç ökaryot hücrenin varlığına işaret eden Cavalier-Smith'ten geldi. Bu hücrelerin varlığının, argümanı çürüttüğü kanısında değilim, çünkü en güçlü seçim baskıları, dış zarları üzerinden soluyan prokaryotlara karşı çalışır. Bir fagosit evrildiğinde, çeşitli koşullar altında bir parçasının ya da başka parçalarının kaybolup gitmesi mümkündür; bu, parazitlerde yaygın olan indirgeyici bir evrim sürecidir. Tam anlamıyla evrilmiş bir fagositin belli koşullar altında mitokondrilerini kaybetmesi, bir prokaryotun mitokondrilerin yardımı olmaksızın bir fagositte evrilmesinden daha kolaydır.

BEŞİNCİ BÖLÜM

1. Kimilerine göre bu hanım, İngiltere'nin en ünlü ve en kötü şöhretli aktrisi, Bayan Patrick Campbell'dir. Shaw, *Pygmalion*'daki Eliza Doolittle bölümünü onun için yazmıştır. Kimileri ise bu aktrisin modern dansın skandallarla dolu Kraliçesi Duncan olduğunu söylemektedir. Ama bu hikayenin doğruluğu şüphelidir.
2. Akıntıyı tersine çeviren birkaç Afrika ülkesinden biri olan Uganda'da büyük ölçüde kamuoyunun daha iyi bilgilendirmesi sonucu HIV'nin yaygınlığı on yıllık bir süre zarfında %14'ten %6'ya geriledi. Mesaj prensipte, hatta pratikte yeterince basittir: Korunmasız seksten kaçının. (Bir araştırma, Uganda'nın “ABC rotası”nın –seksten kaçın [abstinence], sadık ol [be faithful], prezervatif kullan [use condoms]– başarısının büyük ölçüde bu koşullardan sonuncusuna atfedilebileceğini göstermiştir.)

3. Richard Dawkins'in *The Selfish Gene*'de laf arasında tahmin ettiği, o zamandan bu yana onun nüfuz edici hayal gücünün bile ötesine taşınmış davranış biçimi.
4. Bakteriler bu anlamda tam olarak klonlanarak kopyalanmazlar, çünkü başka kaynaklardan yanal transferle de DNA alırlar. Bu anlamda bakteriler aseksüel ökaryotlardan çok daha esnekler. Bu durumun bakteriler açısından yarattığı farklılık, genellikle genlerin yanal transferiyle sağlanan antibiyotik direncinin hızla yayılmasında görülebilir.
5. Bu hikaye Matt Ridley tarafından marka önsezisiyle, ilk kez 1993'te yayınlanan *The Red Queen* adlı kitabında anlatılmıştır.
6. Bağışıklık sisteminin bunu yapmak üzere evrildiğine itiraz edebilirsiniz. Fakat gerçekten de bunun için evrilmiştir, aslında bağışıklık sisteminin sadece seksle düzeltilebilecek bir zayıflığı vardır. Bağışıklık sisteminin çalışabilmesi için, "ben" ile "yabancı" arasında ayırım yapması gerekir. "Ben"i tanımlayan proteinler kuşaktan kuşağa değişmeden kalırlarsa, bir parazitin bağışıklık sisteminden sıyırmak için yapması gereken tek şey, kendisini "ben" gibi görünen proteinlerin içine kamufle etmektir. Dumanları, aynaları boşverin de kolay hedefi arayın. Bir bağışıklık sistemi olan bütün klonların başına gelecek şey budur: Sadece seks (ya da kritik hedeflerdeki çok yüksek mutasyon hızları) bağışıklık sisteminin "ben" algısını her kuşakta değiştirebilir.
7. Pek de doğru değildir. Y kromozomunun tamamen ortadan kaybolmamış olmasının nedeni, aynı genin çok sayıda kopyasını taşıyor olmasıdır. Kromozom açıkça ikiye katlanır, aynı kromozomdaki genler arasında yeni kombinasyonlar oluşmasını mümkün kılar. Böyle sınırlı bir yeniden kombinasyon bile, en azından çoğu memelide Y kromozomunu unutuluştan kurtarmış gibi görünmektedir. Ama asyatik köstebek faresi gibi bazıları Y kromozomunu tümüyle kaybetmiştir. Bu türlerin erkeklerinin nasıl belirlendiği belirsizdir, ama erkeklerin ille de dejenere kromozomumuzla aynı akibete uğramayacak olması insanın içini rahatlatır.
8. Bu iki ifade, özellikle birbirine ters düşen iki yön hakkında, ev sahibi hücrenin kimliği ya da hücreler arasındaki simbiyotik birliğin niteliği hakkında bir şey söylemez. Bu senaryo itibarıyla, ev sahibi hücrenin bir çekirdeğinin, bir hücre duvarının ya da fagotik bir hayat tarzının olup olmaması da önemli değildir.

Dolayısıyla ökaryot hücrenin kökeni birçok bakımdan tartışmalı olsa da, burada özetlediğimiz fikirler herhangi bir kuramdan bağımsızdır.

ALTINCI BÖLÜM

1. William Croone, Kraliyet Cemiyeti'nin kurucu üyelerinden biridir, ismi Cemiyet'in biyoloji bilimlerindeki başlıca konferans dizisi Croonian Konferansları'nda yaşar.
2. Churchill meşhur sözünde şöyle yazmıştır: "Tarih bana karşı nazik olacaktır, çünkü onu yazmaya yeltendim." Churchill'in yetkin eserleri 1953'te hak ettikleri üzere Nobel Edebiyat Ödülü'ne layık görüldüler. Tarih yazını en son ne zaman ebediyat ödülü kazanmıştı dersiniz?
3. Perutz ve Kendrew, öncelikle ispermeçet balinasında miyoglobininin yapısını çözdüler, bu ilginç bir tercihmiş gibi görünüyordu. Bunu çözmelerinin sebebi, balina avcılarının güvertelerindeki kan ve pıhtı havuzu içinde miyoglobinin kristalize olduğunun görülmesiydi, anlaşıldığı üzere miyoglobin balinalar gibi dalan memelilerin kaslarında daha yüksek bir yoğunlukta bulunuyordu. Bu kristalize olma eğilimi önemlidir, çünkü kristalografinin işleyebilmesi için, bir kristal biçimine ya da en azından tekrarlanan bir yapıya ihtiyacı vardır.
4. Farklı lif karışımlarından farklı kaslar oluşmuştur. Hızlı seçiren lifler güçleri için, hızlı ama verimsiz olan anaerobik solumaya dayanır: Bu gibi lifler çabucak büzüşürler (hızlı miyosinlerle) ama çabuk yorulurlar. Zengin kılcal damar ağlarına, mitokondri- lere ya da miyoglobine, aerobik soluma donanımlarına pek ihtiyaçları yoktur; bu da onlara ağırlıklı olarak beyaz bir renk verir, beyaz et olarak görünürler. Yavaş seçiren lifler genellikle kırmızı ette bulunur ve aerobik solumaya dayanırlar (daha yavaş miyosinlerle). Daha yavaş büzüşürler, ama kolay kolay yorulmazlar.
5. Burada aslında hafif bir basitleştirme vardır: Gen dizilimleri yüzde 80 aynıdır, ama proteindeki amino asitlerin dizilimi yüzde 95 aynıdır. Aynı amino asidi şifrelemenin birkaç yolu olduğundan bu mümkündür (ikinci bölüme bakınız). Bu uyumsuzluk, gen dizilimindeki düzenli mutasyonları, onların yanı sıra, orijinal gen dizilimini koruma yönünde güçlü bir seçilimi yansıtır. Gen diziliminde neredeyse sadece seçilimin izin verdiği değişiklikler, zincirdeki amino asitlerin kimliğini değiştirmez. Bu da seçilimin işbaşında olduğuna dair küçük işaretlerden biridir.

6. Elbette ki bu değişiklikler aslında tam tersi şekilde meydana geldi: İlerleyen motorlar sonunda kalın kas lifleri haline geldi. Bu belki de neden kastaki her bir myozin molekülünün, faydalı bir şekilde koordine olmasalar da, hâlâ iki başı olduğunu açıklar.
7. Bakteriler de ökaryot hücrelerde bulunan her şeyden çok farklı bir kamçı kullanarak hareket edebilir. Bu kamçı aslında kabaca bir tirbuşona benzer, bir protein motoru sayesinde kendi ekseninde etrafında döner. Bakteri kamçısı sıklıkla, "indirgenemez karmaşıklığın" bir örneği olarak sunulmuştur, ama bu argüman başka yerlerde kapsamlı bir biçimde ele alındığından burada bu konuya girmek gibi bir niyetim yok. Bakteri kamçısı hakkında daha fazlasını öğrenmek istiyorsanız, lütfen, akıllı tasarım hareketinin amansız karşıtları arasında yer alan, ibadetini gözetken bir katolik olan, önde gelen biyokimyagerlerden Ken Miller'ın kaleme aldığı *The Flagellum Unspun*'ı okuyun. Miller, hayatın moleküller ayrıntılarının hepsinin evrimle açıklandığı inancıyla Tanrı'ya inanç arasında hiçbir çelişki görmemektedir. Akıllı tasarım savunucularının da çifte bir hezimete uğradığını söyler, bunlar "bilim tarafından reddedilmişlerdir, çünkü olgulara uymazlar, dinde de elleri boş çıkmıştır, çünkü Tanrı'yı pek düşünmezler."
8. Özellikle de hücrelerin sinyal verme sürecinde yer alan moleküller bir "açma-kapama" ailesi olan G-proteinleri. Bunların bakterisel akrabaları, geniş bir aile olan GTPase proteinleridir. İsimler önemli değildir; protein ataların bilindiğini söylemek yeterlidir.
9. *Bovine Spongiform Encephalopathy*, yani BSE, daha iyi bilinen adıyla deli dana hastalığı bu kadar bile yararlı olmayan bir örnektir. BSE prionlarla, yani bulaşıcı parçacıklar olarak hareket eden proteinlerle aktarılan bulaşıcı bir hastalıktır. Prionlar kendilerine bitişik proteinlerin yapısını değiştirir. Değişen proteinler polimerleşerek uzun lifler oluşturur, başka bir deyişle, bir tür hücre iskeleti oluştururlar. Prionlar patolojik görülseler de, son dönemde yapılan araştırmalar, prion benzeri proteinlerin beyindeki sinapslarda uzun dönemli hafızanın oluşumunda bir rol oynamış olabileceğini ileri sürmektedir.

YEDİNCİ BÖLÜM

1. Eski okulumu üne kavuşturduğunu iddia eden pek az kişiden biri de Oxford'la yapılan bir tekne yarışında Cambridge adına takım kaptanlığını üstlenen bir gençti. Cambridge teknesini doğ-

ruca bir barkanın üstüne doğru sürdü ve ağzı olup dili olmayan tayfasıyla birlikte suyun dibini boyladı. Daha sonraki açıklamalarına bakılırsa, barka kör noktasına denk gelmişti.

2. "Bunu görebiliyorum, gerçekten halinden memnun değilse bile, memnun olmaktan çok uzakta."
3. Primatlar dışında çoğu memelinin uyum sağlama, yani uzak mesafeye odaklanmışken değiştirip yakına odaklanma becerisinden yoksun olduğunu biliyor muydunuz? Bu da fazladan bir yetektir.
4. Amonitlerin nesli dinozorlarla birlikte tükenmiş, muhteşem helezonik kabukları Jurassic dönemi kayalarında fosil olarak kalmıştır. Benim en beğendiğim numune Dorset'te, Swanage'de denize uzanan yarların üstünde baş döndürücü, yaşlanmakta olan bir kaya tırmanıcısı için baştan çıkarıcı bir ulaşılmazlığı olan bir çıkıntıya gömüldü.
5. Trilobit gözünün evriminde, Şekil 7.2'de yer verilmeyen son aşama, hazır yüzlerin kopyalanıp bileşik bir göz oluşturmalarıdır. Bu hiç de sorun değildir: Hayat mevcut kısımların kopyalanmasında iyidir.
6. Benim en beğendiğim *Entobdella soleae* isimli küçük parazit kurtçuktur, bu kurtçuğun birbirleriyle birleşmiş mitokondrilerden oluşan bir merceği vardır. Mitokondriler normalde karmaşık hücrelerin "enerji üretim merkezidir", yaşamak için ihtiyaç duyduğumuz bütün enerjiyi üretirler, özel optik özelliklere de kesinlikle sahip değildirler. Ashına bakılırsa, başka mitokondrilerde de birleşme zahmetine bile girmemiş mitokondri topluluklarından oluşan mercekler vardır. Öyle görünüyor ki sıradan hücre bileşenlerinden oluşan bir topluluk, ışığı bir yarar sağlayacak kadar iyi bükür.
7. Bell Laboratuvarları ekibi aslında elektronik ve optik aygıtlarda kullanılmak üzere mikromercek dizilerinin ticari üretimiyle ilgileniyordu. Normal, ama kusurlu bir teknolojik yaklaşım benimseyip bu dizileri lazerlerle donatmak yerine, ekip biyolojiden (can alıcı kelime biyomimetiktir) alınan dersleri izledi ve doğanın bu işi onlar için yapmasına izin verdi. Başarıları 2003'te *Science*'ta yayınlandı.
8. Plymouth'taki Deniz Biyolojisi Cemiyeti laboratuvarının başkanı müteveffa Sir Eric Denton, bunu başka bir biçimde gayet güzel ifade etmişti: "İyi bir sonuç elde ettiğinizde, deneyi tekrarlama- dan önce güzel bir yemek yiyin. Hiç olmazsa güzel bir yemek yemiş olursunuz."

9. Keskin gözlüler ya da meseleyi önceden bilenler, "kırmızı" koninin en fazla 564 nm soğurduğunu fark edecektir, bu da kırmızı değildir, tayfin sarımsı yeşil kısmında yer alır. Bütün canlılığına rağmen, kırmızı hayal gücümüzden çıkan tam bir uydurmacadır. Beyin iki farklı koniden gelen bilgileri asimile ettiğinde kırmızı "görürüz". Yeşil koniden hiç sinyal gelmez, sarımsı yeşil koniden de sönmeye yüz tutmuş bir sinyal gelir. Sadece hayal gücünün kuvvetini göstermeye yarar. Bir dahaki sefere, iki farklı kırmızı tonun birbirine uygun düşüp düşmediğini tartışırken, karşı tarafa "doğru" bir cevap olmadığını hatırlatın; yanılıyor olsa gerektir.
10. Bütün paparazzilerin bildiği üzere, mercek ne kadar büyük olursa o kadar iyi görür; aynı şey gözler için de geçerlidir. Terside besbelli ki doğrudur ve merceğin büyüklüğünü, böcek bileşik gözünün tek tek yüzlerinin boyutuna yakın bir boyutla sınırlar. Mesele sadece mercek büyüklüğü değil, ışığın dalga boyuyla da ilgilidir; kısa dalga boyları daha iyi çözünürlük verir. Herhalde bu durum, bugün böceklerin ve ilk (küçük) omurgalıların ultraviyole ışınımında gördüğünü açıklar: Çünkü ultraviyole küçük gözlerde daha iyi çözünürlük verir. Bizim ultraviyoleye ihtiyacımız yok, çünkü daha büyük bir merceğimiz var, bu yüzden de tayfin bu daha fazla hasar verici kısmını bir tarafa bırakabiliyoruz. İlginçtir, böceklerin ultraviyolede görme becerisine sahip olmaları, çiçeklerde bizim sadece beyaz olarak gördüğümüz örüntüleri ve renkleri algılayabildikleri anlamına gelir, bu da dünyada neden bu kadar çok beyaz çiçek olduğunu açıklar: Polenleyici böcekler açısından bu çiçekler zengin desenlerle doludur.
11. Bakterisel rodopsinler yaygındır. Hem algisel hem hayvansal rodopsinlerle benzer bir yapıları vardır, gen dizilimleri de algisel rodopsinlerle ilgilidir. Bakteriler rodopsinleri hem ışık sensörleri hem de fotosentezin bir biçimi için kullanır.

SEKİZİNCİ BÖLÜM

1. Clement Freud, Sigmund Freud'un torunuydu, bir süre de liberal bir siyasetçi olmuştu. Çin'e yaptığı resmî bir ziyarette, kendisinden daha alt düzey bir meslektaşına daha büyük bir süit verilmesine şaşırıyordu. O meslektaşının Winston Churchill'in torunu olduğu açıklanmıştı kendisine. Clement Freud, "İlk ve son kez birinin büyükbabası büyükbabama bastı!" diye anlatıyordu bu olayı.

2. Bunun kesin bir geçerliliği yoktur. Daha büyük hayvanlar küçük hayvanlara kıyasla kilo başına daha az ısı üretir, yani metabolik hız büyüklükle birlikte geriler. Bunun nedenleri tartışmalıdır, burada ayrıntıya girmeyeceğim. Tartışma hakkında bilgilenmek isteyenler, daha önceki kitabım *Power, Sex, Suicide: Mitochondria and the Meaning of Life*'a bakabilir. Büyük hayvanların, kilo başına daha az ısı üretseler de, ısıyı küçük hayvanlardan daha iyi koruduğunu söylemek yeterlidir.
3. Blues efsanesi Howlin' Wolf'un affına sığınırım: "Bazıları öyle yaratılmış, bazıları böyle. Yapıma bakıp da şişko demeyesin. Rahat için yaratıldım ben, hız için değil."
4. Bütün bu özelliklerin nasıl olup da bir seferde seçilebildiğini anlamakta güçlük çekiyorsanız, etrafınıza şöyle bir göz gezdirin. Bazıları bariz bir biçimde diğerlerinden daha atletiktir, insanların küçük bir bölümü Olympos tanrılarına özgü bir yapıya sahiptir. Bunu misyon olarak kabul etmek istemeyebilirsiniz, ama atletleri atletlerle çiftleştiren ve sadece en uygunları seçen bir program hiç kuşkusuz "süper atletler" yaratmayı başaracaktı. Fareler üzerinde şeker hastalığını incelemek üzere bu tür deneyler yürütülmüş, "aerobik kapasite" sadece 10 nesilde yüzde 350 artırılmıştı (şeker hastalığı riski de azaltılmıştı).
5. Kuvvetle savunulan ilginç bir olasılık da hücre zarlarının lipid bileşimiyle ilgilidir. Hızlı bir metabolizma, malzemelerin zarlardan hızlı geçmesini gerektirir, bu da genellikle doymamış çoklu yağ asitleri oranının nispeten yüksek olmasını gerektirir, bu yağ asitlerinin bükümlü zincirleri daha büyük bir akışkanlık sağlar, donmuş yağlarla sıvı yağlar arasındaki fark budur. Hayvanlar yüksek aerobik kapasiteleri sayesinde seçiliyorsa, daha fazla doymamış çoklu yağ asidi biriktirme eğilimi gösterirler; bu yağ asitlerinin iç organlardaki varlığı, dinlenme sırasındaki metabolizma hızını da yüksek olmaya zorlayabilir. Bunun olumsuz tarafı, farklı dokulardaki zarların yağ asidi bileşimlerinin farklılık göstermesinin mümkün olmasıdır; bunun bir ölçüde gerçekleştiği kesindir. Dolayısıyla ben bunun sorunu çözmediği kanısında değilim. Sıcakkanlı hayvanların iç organlarında neden daha fazla mitokondri olduğunu da açıklamaz. Bu durum, yüksek metabolizma hızının, lipid bileşimiyle "tesadüfen" seçilmiş olmasından ziyade, kasten seçildiğini düşündürmektedir.
6. Edwin Colbert'in 1969'da Antarktika'da fosilleşmiş bir *lystrosaur*

keşfetmesi, tartışmalı levha tektoniği kuramının doğrulanması-na katkıda bulunmuştu, zira Güney Afrika, Çin ve Hindistan'da *lystrosaur* fosilleri zaten bulunmuştu. Antarktika'nın buralara sürüklendiğine inanmak, *lystrosaur*'ların yüzdüğüne inanmak-tan daha kolaydı.

7. Yale'den Richard Prum'a göre, burada kavranması gereken asıl mesele, tüylerin esasen tüpsü olduğudur. Embriyolojinin bakış açısına göre, tüpler plüripotenttir (çeşitli tiplere gelişme kabili-yetine sahiptir), çünkü birkaç eksenleri vardır: Yukarı/aşağı, çap-raz, içeri/dışarı. Sinyal molekülleri eksenlerde erirken, eksenler biyokimyasal bileşenler üretir. Bileşenler de embriyonik gelişimi kontrol eden eksenlerde farklı genleri harekete geçirir. Embriyo-loglara göre, bedenler de esasen "tüptür".
8. Her irtifada nefes nefese kalan eski bir sigara tiryakisi ve dağcı olarak, kuşların dumandan nasıl etkileneceğini yeni yeni anlıyo-rum; dumanı sürekli, yüksek bir verimlilikle içe çekmenin etkisi baş döndürücü olsa gerekti.
9. *Theropod* kafataslarının büyüklüğü, beyinlerinin büyük olduğu anlamına gelir, herhalde metabolizma hızının yüksek olması bunu mümkün kılmıştı. Ama beyin büyüklüğünü yorumlamak zordur, çünkü birçok sürüngenin kafatası beyinle dolu değildir. *Theropod* kafatasları üzerindeki izler, beyne giden kan damar-la-rının kafatasına değdiğini, yani *theropod*'ların beyinlerinin kafa-tasını doldurduğunu düşündürür, ama bu da pek kesin değildir. Büyük bir beyne sahip olmanın, sıcakkanlı olmaktan daha ucuz yolları da vardır, arada mutlak bir bağlantı yoktur.
10. Bütün bunların kanıtı, "izotopik imzalar" olarak kayalarda sak-lanmıştır. Daha fazla bilgilenmek isteyenlere, *Nature*'a bu konu-da yazdığım bir makaleyi önerme cüretinde bulunacağım: "Rea-ding the Book of Death", *Nature* (July, 2007).

DOKUZUNCU BÖLÜM

1. Michael Gazzaniga'nın *The Social Brain* adlı kitabında yazdığına göre, hocası Roger Sperry, Vatikan'daki bir konferanstan döndü-günde, Papa'nın, tam sözcükler olmasa da esasen "bilim insanla-rının beni, Kilise'nin zihni alabileceğini" söylediğini anlatmıştı.
2. Zihin ve beyin arasında bir fark olduğunu düşünmesem bile, kıs-men böyle bir ikiliğin dile ne kadar derinden işlemiş olduğunu vurgulamak için, kısmen de açıklamanın ne kadar güç olduğunu

yansıttığı için hiç utanmadan, ikisi arasında bir fark olduğunu varsayan ikilikçi bir dil kullanıyorum. Zihin ve beyin aynı şeyse, neden öyle görünmediklerini açıklamamız gerekir. “Bu bir yanılsama!” deyip işin içinden çıkıvermek o kadar da hoş değil, yanılsamanın moleküler temeli nedir yani?

3. İlk Derin Mavi (Deep Blue) 1996'da Kasparov karşısında tek bir oyunu kazanmasına rağmen bir maç serisini kaybetti. Bilgisayarın yenilenmiş versiyonu Daha Derin Mavi (Deeper Blue) 1997'de Kasparov karşısında bir maç serisini kazandı, ama Kasparov zaman zaman bilgisayarın hamlelerinde “derin bir zeka ve yaratıcılık” gördüğünü söyleyerek IBM'i hileyle suçladı. Öte yandan bir grup bilgisayar programcısı bir dahiyi satrançta yenebiliyorsa, bunun anlamı da bir o kadar kötüdür: Ancak toplanınca deha oluyorlar demektir.
4. Bu gibi tuhaf vakalarla ilgilenenlere, V. S. Ramachandran'ın nöroloji ve evrimde derin dayanakları olan büyüleyici kitaplarını tavsiye ediyorum.
5. Salınımlar, tek tek nöronların elektiriksel faaliyetlerindeki ritmik değişikliklerdir; yeterince fazla salınım uyum içinde hareket ederse, EEG'de tespit edilebilirler. Bir nöron ateşlediğinde depolarize olur, yani kalsiyum ve sodyum gibi iyonlar hücreye doluşurken, zarın elektirik yükü kısmen dağılır. Nöronsal ateşleme rastgele ve dağınıksa, EEG'de düzenli bir şey tespit etmek zor olur; ama beyinde çok sayıda nöron ritmik dalgalar halinde önce depolarize, sonra yeniden polarize olursa, bunun etkileri EEG'de beyin dalgası olarak yakalanabilir. 40 Hz'lik bir bölgedeki salınımlar, birçok nöronun eşzamanlı olarak, kabaca her 25 milisaniyede bir ateşlediği anlamına gelir.
6. Sinapslar, nöronlar arasında bulunan, bir sinir itkisinin geçişini fiziksel olarak kesintiye uğratan (yani ateşlemeyi yanda kesen) küçük, mühürlü açıklıklardır. Bir itki bir sinapsa ulaştığında, sinir ileticisi denilen kimyasallar salınır. Sinir ileticileri bu açıklığa yayılır, “post-sinaptik” nörondaki alıcılara bağlanır, onu ya harekete geçirir ya inhibe eder ya da sinapsları güçlendiren ya da zayıflatan uzun vadeli değişikliklere neden olurlar. Hattıraların oluşumunda ve öğrenmenin gerçekleşmesinde yeni sinapsların oluşumu ya da mevcut sinapsların değişimi söz konusudur, gerçi mekanizmaların ayrıntılarıyla ilgili henüz keşfedilmemiş çok fazla şey vardır.

7. Bilincin tıpkı bir film gibi “boş çerçeveler”den oluştuğu yönünde insanın ağzını sulandıran kanıtlar bile vardır. Bu çerçevelerin süresi, onlarca milisaniye ile yüzlerce milisaniye arasında değişir. Duyguların etkisiyle bu çerçevelerin uzaması ya da kısalması, farklı durumlarda zamanın neden yavaşlamış ya da hızlanmış gibi görüldüğünü açıklayabilir. Çerçeveler her 100 milisaniye yerine her 20 milisaniyede bir kurulursa, zaman beş kat daha yavaşlamış gibi olacaktır: Bir kolun bir bıçağa uzanma hareketini ağır çekimde izliyormuş gibi oluruz.
8. Bilinci oluşturan malzeme, yazar Philip Pullman’ın *His Dark Materials* üçlemesinde, sanırım James’in “zihin tozuna” atfen “toz” olarak tanımladığı karanlık maddedir.

ONUNCU BÖLÜM

1. Teknik olarak, bakteriler ve bitkilerde gerçek kaspazlar değil, “metakaspaz” enzimler bulunur, ama metakaspazların hayvanlarda bulunan kaspazların evrim sürecindeki habercileri olduğu açıktır, metakaspazlar da onlarla benzer birçok amaca hizmet eder. Yalınlık adına hepsinden kaspaz olarak bahsedeceğim. Daha fazla ayrıntı için bkz. benim *Nature*’da, Mayıs 2008’de yayınlanan “Origins of Death” başlıklı makalem.
2. Enzim silsileleri hücrelerde önemlidir, çünkü küçük bir başlangıç sinyalinin güçlendirirler. Tek bir enzimin harekete geçirildiğini düşünün, bu enzim on hedef enzimi harekete geçirecek, bunların her biri on hedefi daha harekete geçirecektir. Böylece yüz faal enzim olur. Bunların her biri on hedefi daha harekete geçirirse bin, sonra on bin vs. faal enzim olur. Böyle bir silsile altı adımda, hücreyi parçalayan bir milyon celladı harekete geçirir.
3. Bakteriler kolonilerin ötesinde hiçbir zaman gelişemezken, ökar-yot hücreleri çok hücrelilik yoluna sokan, büyüme ve gen biriktirme eğilimi göstermeleri gibi başka nedenler de olmuştu tabii. Bu gelişmenin ardındaki nedenler bir önceki kitabımın *Power, Sex, Suicide*’ın ana temasını oluşturuyordu.
4. Bende hiç *ApoE4* varyantı bulunuyor mu bilmiyorum, ama ailemde gözlenen hastalıklar yelpazesine bakılırsa en azından bir tane bulunmasına hiç de şaşmam. İşte bu yüzden hiç öğrenmem daha iyi. Spor salonunun yolunu tutmam gerekir.
5. Kirkwood, kuramına, Weismann’ın atfını hatırlatarak, “atılabilir soma kuramı” diyordu. Kirkwood da Weismann da bedenin

mikrop hattına tabi olduğunu söyler, Pasifik somonu istisnai bir vakadır.

6. Beklenmedik bazı engeller de olabilir. Katı bir kalori alımını kısıtlama rejimine başlayan bir adam, küçük bir düşüşün ardından beklenmedik bir biçimde bacağına kırmıştı. Ciddi bir osteoporosis geliştirmiş, doktoru da haklı olarak rejimini kesmesi uyarısında bulunmuştu.
7. Bir molekülün besinlerin varlığına ya da yokluğuna nasıl “duyarlı” olabileceğini gerçekten merak edenler için anlatıyorum: SIRT-1, NAD denilen, glükoz gibi substratlar eksildiğinde hücrede oluşan bir solunum koenziminin “harcanmış” biçimine bağlanır ve onun tarafından harekete geçirilir. TOR “redoksa duyarlıdır”, yani faaliyeti hücrenin oksidasyon durumuna göre farklılık gösterir, bu da yine besin bulunup bulunmadığını yansıtır.
8. Daha önce olası bir takasa dikkat çekmiştik: kansere karşı dejeneratif hastalık. SIRT-1’e yol açacak ekstra gene sahip fareler daha sağlıklı oldukları yönünde belirtiler gösterir, ama uzun yaşamazlar. Çoğunlukla da kanserden ölürler, talihsiz bir takastır bu.
9. Varsayılan diğer “saatler”, örneğin telomerlerin (kromozomların ucunda bulunan, her hücre bölünmesinde kısalan şapkalar) uzunluğu, türler arasında ömürle ilişkili görünmez. Korelasyon, nedenselliği kanıtlamasa da iyi bir başlangıç noktasıdır. Korelasyonun bulunmaması az çok nedenselliğin bulunmadığını gösterir. Telomerlerin, sınırsız hücre bölünmesini engelleyerek kansere karşı koruyucu olup olmadığı bilinmeyen bir konudur, fakat ömür uzunluğunu belirlemedikleri kesindir.
10. Birkaç örnekle kastettiğim şeye açıklık getirebilirim: İltihaplanmış bir kesikte gördüğümüz türde akut bir iltihaptan bahsetmiyorum. Ateroskleroz, arter levhalarında madde birikimine kronik iltihaplı tepki verir, iltihabın devam etmesi de süreci ağırlaştırır. Alzheimer hastalığının ardında, beyindeki amyloid levhalarına karşı ısrarlı bir biçimde devam eden iltihabi bir tepki vardır; yaşa bağlı maküler dejenerasyon (retina tabakasının ortasında sarı nokta da denilen küçük bölgedeki bozukluklar), retinal hücrelerin iltihabından kaynaklanır, yeni kan damarlarının gelişmesine ve körlüğe yol açar. Daha sayabilirim: Diabet, kanser, artrit, multiple skleroz ve niceleri. Kronik ılımlı iltihap ortak belirleyicidir. Sigara içme, bu gibi hastalıkları, büyük ölçüde iltihabı ağırlaştırır.

arak azdırır. Oysa tersine, TOR'un engellenmesi, daha önce de gördüğümüz üzere, bağışıklığın ılımlı düzeyde baskılanmasına, bu da iltihabın atılmasına neden olabilir.

11. Glikolitik açma-kapama fikrinin tarihi 1940'larda Warburg'a uzanır, ama kısa süre önce doğrulanmıştır. Genel kural olarak sadece mitokondrisiz yapabilen hücreler kanser hücresine dönüşebilir. En büyük zanlılar, mitokondrilere pek bağımlı olmayan ve sıklıkla da tümorojenezden sorumlu tutulan kök hücrelerdir. Deri hücreleri, akciğer hücreleri, beyaz kan hücreleri, hepsi de mitokondrilerden nispeten bağımsızdır ve hepsi de tümörlerle ilişkilidir.
12. Gustavo Barja'nın dikkat çektiği üzere, evrimin, ömür uzunluğunu bir büyüklük düzeni kadar uzatabilmesinin insan ömründe ciddi bir uzatmaya gitmenin gayet mümkün olduğu anlamına çekilmesi bir zorlamadan ibarettir.

Resimler



- 1.1 Volkanik olarak harekete geçmiş bir siyah baca, Pasifik Okyanusu'nun kuzeydoğusu. Deborah S. Kelley ve Oceanography Society'nin izniyle yeniden basılmıştır. (*Oceanography* cilt 18, no. 3, Eylül 2005)
- 1.2 Doğa Kulesi, Kayıp Kent'te faal bir alkalın oyugu. Deborah S. Kelley ve Oceanography Society'nin izniyle yeniden hazırlanmıştır. (*Oceanography* cilt 18, no. 3, Eylül 2005)
- 1.3 Bir alkalın oyugunun mikroskobik yapısı. Deborah S. Kelley ve Oceanography Society'nin izniyle yeniden hazırlanmıştır. (*Oceanography* cilt 20, no. 4, Aralık 2007)
- 2.1 DNA'nın baz çiftleri.
- 2.2 DNA çifte sarmalı, iki sarmalın birbirlerinin etrafında nasıl dolandığı görülüyor.
- 3.1 Z şemasını gösteren bir çizim. David A. Walker'ın izniyle yeniden basılmıştır. "The Z-scheme-Down Hill all the way", *Trends in Plant Sciences* 7: 183-185: 2002.
- 3.2 Şekerkamışı (*Beta vulgaris*) kloroplastının klasik görünümü. Düsseldorf Üniversitesi'nden Profesör Klaus Kowallik'in izniyle.
- 3.3 Avustralya'nın batısında Shark Bay (Köpekbalığı Körfezi) yakınlarında Hamelin Göleti'nde canlı stromatolitler. Batı Avustralya Üniversitesi'nden Dr. Catherine Colas des Francs-Small'un izniyle.
- 3.4 X-ışını kristalografisinin ortaya koyduğu üzere, oksijen evrilten kompleksin (yakınlarında bir kalsiyum atomunun bulunduğu bir oksijen atomuyla bağlanan dört mangan atomu) kadim mineral yapısı. Yeniden çizim kaynağı: Yano J., vd., "Where Water Is Oxidised to Dioxygen: Structure of the Photosynthetic Mn₄Ca Cluster", *Science* 314: 821; 2006.
- 4.1 Bakteriler gibi prokaryot hücrelerle karmaşık ökaryot hücreler arasındaki farklılıklar.

- 4.2 Hayat ağacının genel kabul gören biçimi.
- 4.3 Ribozomal RNA'ya dayanarak hayat ağacı.
- 4.4 "Hayat döngüsü"nın yeniden çiziminin kaynağı: Rivera MC, Lake JA. "The ring of life provides evidence for a genome fusion origin of eukaryotes", *Nature* 431; 152-55; 2004.
- 4.5 Başka bakterisel hücrelerin içinde yaşayan bakterisel hücreler. Utah Eyalet Üniversitesi'nden Carol von Dohlen'in izniyle.
- 4.6 Hücre çekirdeği zarının yapısı. Bill Martin'in izniyle yeniden basılmıştır: "Archaeobacteria and the origin of the eukaryotic nucleus", *Current Opinion in Microbiology* 8: 630-637; 2005.
- 5.1 Eşeyli organizmalar (yukarıda) ve eşeysiz organizmalarda (aşağıda) yararlı yeni mutasyonların yayılması.
- 6.1 İskelet kasının yapısı, karakteristik şeritler ve tabakalar görüyor. Massachusetts Üniversitesi'nden Profesör Roger Craig'in nazik yardımıyla.
- 6.2 Myozin, David Goodsell'in incelikli suluboyasıyla. San Diego Scripps Araştırma Enstitüsü'nden Dr. David Goodsell'in nazik yardımıyla.
- 6.3 Küf mantarı *Physarus polycephalum*'dan alınan aktin lifleri, tavşan kasından alınmış myozin "ok başlarıyla" süslenmiş. Hugh Huxley'nin izniyle yeniden basılmıştır: Nachmias VT, Huxley HE, Kessler D. *Physarum polycephalum*'dan alınan actomyozin ve aktin çözeltileri ve bunların kas myozininden alınmış ağır meromyozin alt parçasıyla etkileşimleri üzerine elektron mikroskopuyla yapılan gözlemler, *Journal of Molecular Biology* 1970: 50; 83-90.
- 6.4 Bir inekten alınan bir kırkırdak hücresindeki aktin hücre iskeleti, fosforlu phalloidin-FITC ile işaretlenmiş. Westminster Üniversitesi'nden Dr. Mark Kerrigan'ın nazik yardımıyla.
- 7.1 Gözsüz karides *Rimicaris exoculata*, iki çıplak retinanın sırtından geçtiği görülüyor. (Denizlerin Kullanılması İçin Fransız Araştırma Enstitüsü/French Research Institute for Exploitation of the Sea).
- 7.2 Bir gözün evrilmesi için gerekli adımlar dizisi. Dan-Eric Nilsson'un izniyle yeniden basılmıştır; Michel Land ve Dan-Eric Nilsson, *Animal Eyes*, OUP, Oxford, 2002.
- 7.3 *Dalmanitina socialisten* trilobit kristal mercekleri. Edinburgh Üniversitesi'nden Profesör Euan Clarkson'un izniyle.
- 7.4 Denizyıldızı *Ophiocoma wendtii*'nin kristal mercekleri. Harvard Üniversitesi'nden Profesör Joanna Aizenberg'in izniyle.

- 7.5 Rombik kalsit kristalleri. Addadi L. Weiner'in izniyle yeniden basılmıştır, "Control and Design Principles in Biological Mineralisation", *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.* 3; 153-169; 1992. Telif hakkı Wiley-VCH Verlag GMBH & Co. KGaA.
- 7.6 Bir meyve sineği (*Drosophila*) başının elektron mikrografıyla taraması. İsviçre Basel Üniversitesi Biyoloji Merkezi'nden Profesör Walter Gehring'in izniyle.
- 8.1 Kuşların akciğerinde hava akışı. Yeniden çizimin kaynağı: Reese S., vd., "The avian lung-associated immune system: a review", *Vet. Res.* 37; 311-324; 2006.
- 8.2 Bir dinozorda hava kesesi sisteminin temsili. ABD'nin Virginia eyaletine bağlı Arlington'da bulunan Ulusal Bilim Vakfı'ndan Zina Deretsky'nin izniyle.
- 9.1 Hidranensefali hastası bir çocuğun başının MRI taramasındaki görüntüsü. ACR Learning File'dan (Neuroradiology kısmı, ikinci basım), telif 2004. American College of Radiology'nin izniyle yeniden basım. Bu malzemenin başka bir temsili American College of Radiology'nin yazılı iznine tabidir.
- 9.2 Hidranensefali hastası Nikki adında dört yaşındaki bir kız çocuğunun yüzündeki mutluluk ve hoşnutluk ifadesi. Nikki'nin annesi Lynne Trease'in izniyle basılmıştır.

Teşekkürler



Bu kitap kimsesiz bir kitap olmadı. Çoğu zaman küçük oğullarım Eneko ve Hugo da evdelerdi, onların varlıkları çalışmaya yoğunlaşmamı her zaman kolaylaştırmasa da, yazdığım her kelimeye anlam ve hoşnutluk kattı. Eşim Dr. Ana Hidalgo her temayı, her fikri, her kelimeyi, sıklıkla takılacak yeni gözlükler sunarak benimle tartıştı, işe yaramaz kısımları gözünü bile kırpmadan makaslayıp geçti. Hem bilimsel hem edebi açıdan onun yargılarının doğruluğuna dayanmayı öğrendim; bir zamanlar tartışırdım, sonrasında vardığım noktaysa sırf düşünüp yanıldığımı kabul etmek olurdu, artık tavsiyelerini kabul etmekte eline çabuğum. Onsuz bu kitap çok daha kötü olurdu, kitabın iyi yönlerinin birçoğu da ona aittir.

Sonra bir de e-posta sayesinde, gece gündüz demeden dünyanın dört bir yanıyla sürdürdüğüm kafa açıcı sohbetler, kitapta gezinmeye çalıştığım farklı alanlarda çalışan uzmanların düşünceleri, bakış açıları var. Ben her zaman kendi yolumda ilerlemiş olsam da, onların cömertliğini, uzmanlığını çok takdir etmişimdir. Özellikle de Düsseldorf'da Heinrich Heine Üniversitesi'nden Bill Martin'e, Londra Queen Mary Üniversitesi'nden John Allen'a, bugün Caltech'te NASA Jet Propulsion Laboratory'de çalışan Mike Russell'a çok teşekkür ederim. Hepsi de güçlü, orijinal düşünürlerdir; bana zaman ayırdıkları, beni cesaretlendirdikleri, güçlü eleştiriler getirdikleri için ve esin verici bilim aşklarından ötürü hepsine borçluyum. Kendi şevkim birazcık küllenecek olsa, onlara yazdığım bir e-postanın ya da içlerinden biriyle buluşmamın her zaman silkeleyici bir etkisi olmuştur.

Ama salt onlara değil, fikirlerine açıklık getirdikleri, kitabın bölümlerini okuyup yorumlarda bulundukları için başka birçok araştırmacıya da minnettarım. Her bölümde, o alanda çalışan en az iki uz-

manın yapıcı eleştirilerinden yararlandım. Hepsine teşekkür ederim (alfabetik sırayla): Madrid Complutense Üniversitesi'nden Profesör Gustavo Barja, Washington Üniversitesi'nden Profesör Bob Blankenship, Colorado Üniversitesi'nden Profesör Shelley Copley, Alberta Üniversitesi'nden Dr. Joel Dacks, Melbourne Üniversitesi'nden Profesör Derek Danton, New Jersey Rutgers Üniversitesi'nden Profesör Paul Falkowski, Massachusetts Brandeis Üniversitesi'nden Profesör Hugh Huxley, Hollanda Ekoloji Enstitüsü'nden Profesör Marcel Klaasen, Caltech'ten Profesör Christof Koch, Maryland Ulusal Sağlık Enstitüleri'nden Dr. Eugene Koonin, Polonya Jagiellonian Üniversitesi'nden Profesör Pavel Koteja, Sussex Üniversitesi'nden Profesör Michael Land, Uppsala Üniversitesi'nden Profesör Björn Merker, Londra University College'dan Profesör Salvador Moncada, New York Üniversitesi'nden Profesör Jose Musacchio, British Columbia Üniversitesi'nden Profesör Sally Otto, Sydney Üniversitesi'nden Profesör Frank Seebacher, Oxford Üniversitesi'nden Dr. Lee Sweetlove, Washington Üniversitesi'nden Profesör Peter Ward. Bir hata kalmışsa, tümüyle bana aittir.

Hem buradaki hem İspanya'daki aileme sevgileri, destekleri için teşekkür ederim. Özellikle de babam, yazdığı tarih kitaplarından vakit ayırarak, moleküllere karşı sevgisizliğini aşp, hemen hemen bütün bölümleri okudu, yorumlarda bulundu. İlginç bir biçimde giderek daralan, üçüncü kitabımda hâlâ bölümleri okuyup yorumlarda bulunan dost çevreme de müteşekkirim. Özellikle de en çetin zamanlarda bile cömertliğiyle benzersiz Mike Carter'a, kafa açıcı tartışmaları ve nazik yorumları için Andrew Philips'e, tırmanmalar, yürüyüşler ve sohbetler için Paul Asbury'ye teşekkür ederim. Daha genel bir çerçevede squash oyunlarımız, düzenli aralıklarla yaptığımız bilim tartışmaları için Profesör Barry Fuller'a, geniş bir ilgi alanına sahip olduğu, ihtiyacım olduğunda inancını benden esirgemen Profesör Colin Green'e, düzenli aralıklarla bana ne kadar şanslı olduğumu hatırlattığı, sınır tanımayan bir şevke sahip olduğu için Dr. Ian Ackland-Snow'a, yıllar içinde bilim yazını üzerine yaptığımız çok sayıda aydınlatıcı sohbet için, yazarlığa başlamama yardımcı olduğu için Dr. John Emsley'e, misafirperverlikleri sınırsız Profesör Erich ve Andrea Gnaiger'a, yıllar önce biyoloji ve kimyaya karşı bir ömür sürecek sevgimin tohumlarını attıkları için esin verici öğretmenlerim Mr. Devani ve Mr. Adams'a teşekkür ederim.

Son olarak Profile ve WW Norton'daki editörlerim Andrew

Franklin ile Angela von der Lippe'ye teşekkür etmek isterim, başından beri bu kitaba desteklerini ve inançlarını hiç esirgemediler; düzelti konusundaki zevki ve eklektik bilgisi için Eddie Mizzi'ye ve kapsayıcı bakış açısını asla kaybetmeksizin cesaretlendirici sözler sarf etmeye her zaman hazır olan UA'daki menajerim Caroline Dawnay'e de teşekkürlerimi sunarım.

Londra, 2009

Bibliyografya



Hayatın Yükselişi'ni çoğunlukla birinci el kaynaklara dayanarak yazdım, ama aşağıda belirttiğim kitapların hepsi de kavrayışımı derinleştiren, zevkle okuduğum kaynaklardı. İçlerindeki her şeye katılmıyorum, ama bu da iyi bir kitaptan duyulan hazzın bir parçasıdır. Çoğu, genel okur kitlesi için yazılmıştır ve *Türlerin Kökeni* geleneğinde orijinal bilimsel çalışmalardır. Alfabetik sırayla sunuyorum:

David Beerling, *The Emerald Planet* (OUP, 2006). Bitkilerin gezegenimizin tarihindeki etkisi üzerine muhteşem bir kitap. Renkli, büyük evrim çizimleri de içeriyor.

Susan Blackmore, *Conversations on Consciousness* (OUP, 2005). Önde gelen bilim insanları ve filozofların bilinç hakkında çatışan görüşlerini resmetmeye ve anlamlandırmaya yönelik, takdir edilesi derecede tarafsız bir girişimdir.

Jacob Bronowski, *The Ascent of Man* (Little, Brown, 1974). TV dizisinin kitabı. Muhteşem.

Graham Caims-Smith, *Seven Clues to the Origin of Life* (CUP, 1982). Artık bilimsel bakımdan eski bir kitaptır, ama hayatın kimyasının kalbinde yatan ipuçlarını Sherlock Holmesvari bir tutumla incelemesiyle bir eşi daha yoktur.

Graham Caims-Smith, *Evolving the Mind* (CUP, 1998). Kuantum bilinç kuramlarının, tek başına olmakta kararlı bir düşünürün ağzından mükemmel ve olağandışı bir savunusu.

Francis Crick, *Life Itself* (Simon & Schuster, 1981). Yirminci yüzyılın en ince bilimsel zihinlerinden birinin, savunulamaz bir varsayımı savunusu. Eski, ama okumaya değer.

Antonio Damasio, *The Feeling of What Happens* (Vintage Books, 2000). Damasio'nun yazdığı, hepsi de okumaya değer birkaç kitaptan biri. Şiirsel ve yoğun, en iyi olduğu alan nöroloji, en zayıfı evrim.

Charles Darwin, *The Origin of Species* (Penguin, 1985). Gelmiş geçmiş en önemli kitaplar arasında yer alır.

- Paul Davies, *The Origin of Life* (Penguin, 2006). Çok sayıda engeli görmeye biraz yatkın olsa da güzel bir kitap.
- Richard Dawkins, *Climbing Mount Improbable* (Viking, 1996). Gözler gibi karmaşık özelliklerin evrilmesini açıkça ele alan, şaşırtıcı derecede az sayıdaki popüler kitaptan biri. Dawkins'in benzersiz üslubu.
- Richard Dawkins, *The Selfish Gene* (OUP, 1976). Çağımızın en belirleyici kitaplarından biri. Mutlaka okunmalı.
- Daniel Dennett, *Consciousness Explained* (Little, Brown, 1991). Görmezden gelinemeyecek, tartışma yaratmış bir klasik.
- Derek Denton, *The Primordial Emotions* (OUP, 2005). Önemli bir tezi olan, incelikli bir kitap. En iyi yönü de başka araştırmacılar ve filozofların çalışmalarını muhteşem bir biçimde tartışması.
- Christian de Duve, *Singularities* (CUP, 2005). De Duve'nin açık düşünme biçiminin büyük bölümünü kapsayan, yoğun tartışmalarla dolu bir kitap. Kimyasal olarak ayran gönüllülere göre değil, ince bir aklın süzdüklerini okumak isteyenlere.
- Christian de Duve, *Life Evolving* (OUP, 2002). Hayatın biyokimyasal evrimi ve evrendeki yerimiz üzerine, ağıt niteliğinde bir kitap. Bir kuğunun şarkısı gibi, aslında Singularities'den önce yazılmış.
- Gerald Edelman, *Wider than the Sky* (Penguin, 2004). İnce ama yoğun bir kitap. Edelman'ın önemli fikirlerine iyi bir giriş niteliği taşıyor.
- Richard Fortey, *Trilobite!* (HarperCollins, 2000). Fortey'nin bütün kitapları gibi, hoş bir kitap, özellikle de trilobitlerin kristal gözlerinin evrimi üzerine çok iyi bir eser.
- Tibor Ganti, *The Principles of Life* (OUP, 2003). Gerçek dünyanın biyokimyası konusunda eksikleri olsa da, hayatın temel yapısı üzerine orijinal bir çalışma. Fikirlerini istemeye istemeye tartışmaktan geri durdum.
- Stephen Jay Gould, *The Structure of Evolutionary Theory* (Harvard University Press, 2002). Ciddi bir akademik çalışma, ama Gould'un bildik havasını taşıyor, ilginç malzemelerle dolu bir altın madeni.
- Franklin Harold, *The Way of the Cell* (OUP, 2001). Hücre hakkında harika, derin fikirler sunan bir kitap, derin bilimin şiiriyle dolu. Kolayca akıyor her zaman, ama çabanıza değer.
- Steve Jones, *The Language of the Genes* (Flamingo, 2000). Gen meselesine harika bir giriş, tadı damakta kalıyor.
- Steve Jones, *Almost Like a Whale* (Doubleday, 1999). Bir üslupla ve derin bilgiyle güncellenmiş Darwin.

Horace Freeland Judson, *The Eighth Day of Creation* (Cold Spring Harbor Press, 1996). Çığır açıcı bir kitap: Moleküler biyolojinin öncülerıyla, moleküler biyoloji çağının başlangıcında yapılmış söyleşilerden oluşuyor.

Tom Kirkwood, *Time of Our Lives* (Weidenfeld & Nicolson, 1999). Yaşlanmanın biyolojisi üzerine alanın öncülerinden birinin kaleme aldığı, giriş niteliğindeki en iyi kitaplardan biri.

Andre Klarsfeld ve Frederic Revah, *The Biology of Death* (Cornell University Press, 2004). Yaşlanma ve ölüm üzerine, hücrenin bakış açısından kaleme alınmış düşüncelerle dolu bir inceleme. Ender bulunan bir evrim ve tıp harmanı.

Andrew Knoll, *Life on a Young Planet* (Princeton University Press, 2003). Evrimin ilk dönemleri üzerine, önde gelen kahramanlardan birinin yazdığı hoş, anlaşılır bir görüş. Bilgece bir bakış açısı.

Christof Koch, *The Quest for Consciousness* (Roberts & Co., 2004). Bir ders kitabı, okuması kolay değil, ama güzel fikirlerle dolu, kendisine özgü bir havası var. Zihni inceleyen hoş ve dengeli bir zihin.

Marek Kohn, *A Reason for Everything* (Faber and Faber, 2004). Britanyalı beş evrimcinin kısa biyografileri, zarafetle kaleme alınmış güzel fikirler. Cinselliğin evrimi konusunda çok iyi bir çalışma.

Michael Land ve Dan-Eric Nilsson, *Animal Eyes* (OUP, Oxford, 2002). Hayvanların gözleri hakkında, anlaşılır bir dille yazılmış, evrimin muazzam dehasını gayet iyi aktaran bir eser.

Nick Lane, *Power, Sex, Suicide* (OUP, 2005). Hücre biyolojisine ve karmaşıklığın evrimine dair, hücre enerjisi açısından kaleme aldığım kendi incelemem.

Nick Lane, *Oxygen* (OUP, 2002). Dünya üzerinde hayatın tarihi, başrolde karmaşık hayatı mümkün kılan gaz, oksijen var.

Primo Levi, *The Periodic Table* (Penguin, 1988). Aslında gerçek bir bilim kitabı değil, ama şiirle, insanlıkla, bilimle dolu. Bir edebiyat ustasının kaleminden.

Lynn Margulis ve Dorion Sagan, *Microcosmos* (University of California Press, 1997). Biyolojinin ikonlaşmış kişilikleri arasında yer alan, tartışmalara hiç yabancı olmayan birinin ağzından, geniş ölçekte mikrokozmosa hoş bir giriş kitabı.

Bill Martin ve Miklós Müller, *Origin of Mitochondria and Hydrogenosomes* (Springer, 2007). Evrimin tarihinde çığır açan bir olay hakkında birçok yazarın kaleme aldığı akademik bir metin: ökaryot hücre hakkında farklı görüşler.

- John Maynard Smith ve Eörs Szathmáry, *The Origins of Life* (OUP, 1999). Yazarlar, bir klasik haline gelmiş metinleri *The Major Transitions in Evolution*'ı (WH Freeman/Spektrum, 1995) popüler bir dille yeniden işlemiş. Büyük beyinlerin büyük bir eseri.
- John Maynard Smith, *Did Darwin Get It Right?* (Penguin, 1988). Evrimci biyologların artık aramızda olmayan gurusu tarafından anlaşılır bir dille yazılmış, bazısı cinselliğin evrimine değinen denemeler.
- Oliver Morton, *Eating the Sun* (Fourth Estate, 2007). Hazine gibi bir kitap, bir romancının insanlara ve mekana bakışı, moleküller ve gezegenlere dair derin hislerle birleştirilmiş. Özellikle karbon krizi konusunda çok iyi bir kitap.
- Andrew Parker, *In the Blink of an Eye* (Free Press, 2003). Bakış açısı biraz dar olsa da çok şey sunuyor.
- Vilayanur Ramachandran, *The Emerging Mind* (Profile, 2003). Ramachandran'ın 2003 tarihli Reith konferansları, aslında daha önceki kitabı *Phantoms in the Brain*'in sıkıştırılmış versiyonu. Orijinal, imgelemi güçlü bir zihnin sesi.
- Mark Ridley, *Mendel's Demon* (Weidenfeld & Nicolson, 2000). Entelektüel bir ziyafet, karmaşıklığın evrimine ilişkin derinlikli malzemesi ni büyük bir zekayla sunuyor.
- Matt Ridley, *The Red Queen* (Penguin, 1993). Cinselliğin ve cinsel davranışların evrimi üzerine çığır açıcı bir eser, Ridley'nin alameti farıkası olan üslubunu yansıtıyor.
- Matt Ridley, *Francis Crick* (Harper Press, 2006). Yirminci yüzyılın en ilginç kişiliklerinden birinin birinci sınıf bir biyografisi. Yazar, konuya sevgisini tehlikeye atmaksızın, hoş nüanslar çizmiş.
- Steven Rose, *The Making of Memory* (Vintage 2003). Hafızanın temelindeki nöral gelişmeler üzerine hoş bir kitap, en iyi tarafı da bilimin toplumsal çerçevesinin çizilme biçimi.
- Ian Stewart ve Jack Cohen, *Figments of Reality* (CUP, 1997). Bilince eklektik, nüktedan ve incelikli bir bakış. Hem eğlendiriyor hem düşündürüyor.
- Peter Ward, *Out of Thin Air* (Joseph Henry Press, 2006). Dinozorların neden o kadar uzun süre baskın olduğuna dair ciddi ve orijinal bir varsayım.
- Carl Zimmer, *Parasite Rex* (The Free Press, 2000). Parazitlerin önemi üzerine muhteşem bir kitap, cinselliğin evriminde parazitlerin rolü üzerine muhteşem bir bölüm içeriyor.

BAŞLICA KAYNAKLAR

Francis Crick bir zamanlar, "Sıradan bir bilimsel makale kadar anlaşılması zor, okuması çetrefilli bir başka nesir biçimi daha yok," diye yakınmıştı. Hakkı vardı, ama "sıradan" diyordu. Oysa en has bilimsel makaleler, ince ince süzölmüş anlamlarla dolup taşabilir, insanın zihnini bir sanat eseri kadar etkileyebilir. Burada sunduğum listeyi bu çapta makalelerle sınırlı tutmaya çalıştım: Kapsamlı bir liste değil, bu kitabı yazarken düşünme biçimimi en fazla etkileyen makalelerden oluşan bir seçki. Bir-iki genel değerlendirmeyi de literatüre katkı babında ekledim. Bölümlere göre alfabetik sırayla.

Giriş

Russell R. J., Gerike U., Danson M. J., Hough D. W., Taylor G. L. Structural adaptations of the cold-active citrate synthase from an Antarctic bacterium. *Structure* 6: 351-61; 1998.

Birinci Bölüm: Hayatın Kökeni

Fyfe W. S., "The water inventory of the Earth: fluids and tectonics", Geological Society, London, Special Publications 78: 1-7; 1994.

Holm N. G., vd., "Alkaline fluid circulation in ultramafic rocks and formation of nucleotide constituents: a hypothesis", *Geochemical Transactions*, 7:7; 2006.

Huber C., Wächtershäuser G., "Peptides by activation of amino acids with CO on (Ni, Fe)S surfaces: implications for the origin of life", *Science* 281: 670-72; 1998.

Kelley D. S., Karson J. A., Fruh-Green G. L., vd., "A serpentinite-hosted ecosystem: the Lost City hydrothermal field", *Science* 307: 1428-34; 2005.

Martin W., Baross J., Kelley D., Russell M. J., "Hydrothermal vents and the origin of life", *Nature Reviews in Microbiology* 6: 805-14; 2008.

Martin W., Russell M. J., "On the origin of biochemistry at an alkaline hydrothermal vent", *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B* 362: 1887-925; 2007.

Morowitz H., Smith E., "Energy flow and the organization of life", *Complexity* 13: 51-9; 2007.

Proskurowski G., vd., "Abiogenic hydrocarbon production at Lost City hydrothermal field", *Science* 319: 604-7; 2008.

Russell M. J., Martin W., "The rocky roots of the acetyl CoA pathway", *Trends in Biochemical Sciences* 29: 358-63; 2004.

Russell M., "First Life", *American Scientist* 94: 32-9; 2006.

Smith E., Morowitz H. J., "Universality in intermediary metabolism", *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 101: 13168-73; 2004.

Wächtershäuser G., "From volcanic origins of chemoautotrophic life to bacteria, archaea and eukarya", *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B* 361: 1787-806; 2006.

İkinci Bölüm: DNA

Baaske P., vd., "Extreme accumulation of nucleotides in simulated hydrothermal pore systems", *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 104: 9346-51; 2007.

Copley S. D., Smith E., Morowitz H. J., "A mechanism for the association of amino acids with their codons and the origin of the genetic code", *PNAS* 102: 4442-7, 2005.

Crick F. H. C., "The origin of the genetic code", *Journal of Molecular Biology* 38: 367-79; 1968.

De Duve C., "The onset of selection", *Nature* 433: 581-2; 2005.

Freeland S. J., Hurst L. D., "The genetic code is one in a million", *Journal of Molecular Evolution* 47: 238-48; 1998.

Gilbert W., "The RNA world", *Nature* 319: 618; 1986.

Hayes B., "The invention of the genetic code", *American Scientist* 86: 8-14; 1998.

Koonin E. V., Martin W., "On the origin of genomes and cells within inorganic compartments", *Trends in Genetics* 21: 647-54; 2005.

Leipe D., Aravind L., Koonin E. V., "Did DNA replication evolve twice independently?", *Nucleic Acids Research* 27: 3389-401; 1999.

Martin W., Russell M. J., "On the origins of cells: a hypothesis for the evolutionary transitions from abiotic geochemistry to chemoautotrophic prokaryotes, and from prokaryotes to nucleated cells", *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B* 358: 59-83; 2003.

Taylor F. J. R., Coates D., "The code within the codons", *Biosystems* 22: 177-87; 1989.

Watson J. D., Crick F. H. C., "A structure for deoxyribose nucleic acid", *Nature* 171: 737-8; 1953.

Üçüncü Bölüm: Fotosentez

Allen J. F., Martin W., "Out of thin air", *Nature* 445: 610-12; 2007.

Allen J. F., "A redox switch hypothesis for the origin of two light reactions in photosynthesis", *FEBS Letters* 579: 963-68; 2005.

- Dalton R., "Squaring up over ancient life", *Nature* 417: 782-4; 2002.
- Ferreira K. N., vd., "Architecture of the photosynthetic oxygen-evolving center", *Science* 303: 1831-8; 2004.
- Mauzerall D., "Evolution of porphyrins-life as a cosmic imperative", *Clinics in Dermatology* 16: 195-201; 1998.
- Olson J. M., Blankenship R. E., "Thinking about photosynthesis", *Photosynthesis Research* 80: 373-86; 2004.
- Russell M. J., Allen J. F., Milner-White E. J., "Inorganic complexes enabled the onset of life and oxygenic photosynthesis", *Energy from the Sun: 14th International Congress on Photosynthesis* içinde, Allen J. F., Gantt E., Golbeck J. H., Osmond B. (yayına hazırlayanlar), Springer 1193-8; 2008.
- Sadekar S., Raymond J., Blankenship R. E., "Conservation of distantly related membrane proteins: photosynthetic reaction centers share a common structural core", *Molecular Biology and Evolution* 23: 2001-7; 2006.
- Sauer K., Yachandra V. K., "A possible evolutionary origin for the Mn_4 cluster of the photosynthetic water oxidation complex from natural MnO_2 precipitates in the early ocean", *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 99: 8631-6; 2002.
- Walker D. A., "The Z-scheme-Down Hill all the way", *Trends in Plant Sciences* 7: 183-5; 2002.
- Yano J., vd., "Where water is oxidised to dioxygen: structure of the photosynthetic Mn_4Ca cluster", *Science* 314: 821-5; 2006.
- Dördüncü Bölüm: Karmaşık Hücre**
- Cox C. J., vd., "The archaeobacterial origin of eukaryotes", *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 105: 20356-61; 2008.
- Embley M. T., Martin W., "Eukaryotic evolution, changes and challenges", *Nature* 440: 623-30; 2006.
- Javaeux E. J., "The early eukaryotic fossil record", *Origins and Evolution of Eukaryotic Endomembranes and Cytoskeleton* içinde (yayına hazırlayan Gaspar Jekely); Landes Bioscience 2006.
- Koonin E. V., "The origin of introns and their role in eukaryogenesis: a compromise solution to the introns-early versus introns-late debate?", *Biology Direct* 1: 22; 2006.
- Lane N., "Mitochondria: key to complexity", *Origin of Mitochondria and Hydrogenosomes* içinde (yayına hazırlayanlar Martin W., Müller M.); Springer, 2007.
- Martin W., Müller M., "The hydrogen hypothesis for the first eukaryote", *Nature* 392: 37-41; 1998.

- Pisani D., Cotton J. A., McInemey J. O., "Supertrees disentangle the chimerical origin of eukaryotic genomes", *Molecular Biology and Evolution* 24: 1752-60; 2007.
- Sagan L., "On the origin of mitosing cells", *Journal of Theoretical Biology* 14: 255-74; 1967.
- Simonson A. B., vd., "Decoding the genomic tree of life", *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 102: 6608-13; 2005.
- Taft R. J., Pheasant M., Mattick J. S., "The relationship between non-protein coding DNA and eukaryotic complexity", *BioEssays* 29: 288-99; 2007.
- Vellai T., Vida G., "The difference between prokaryotic and eukaryotic cells", *Proceedings of the Royal Society of London B* 266: 1571-7; 1999.
- Beşinci Bölüm: Seks**
- Burt A., "Sex, recombination, and the efficacy of selection: was Weismann right?", *Evolution* 54: 337-51; 2000.
- Butlin R., "The costs and benefits of sex: new insights from old asexual lineages", *Nature Reviews in Genetics* 3: 311-17; 2002.
- Cavalier-Smith T., "Origins of the machinery of recombination and sex", *Heredity* 88: 125-41; 2002.
- Dacks J., Roger A. J., "The first sexual lineage and the relevance of facultative sex", *Journal of Molecular Evolution* 48: 779-83; 1999.
- Felsenstein J., "The evolutionary advantage of recombination", *Genetics* 78: 737-56; 1974.
- Hamilton W. D., Axelrod R., Tanese R., "Sexual reproduction as an adaptation to resist parasites", *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 87: 3566-73; 1990.
- Howard R. S., Lively C. V., "Parasitism, mutation accumulation and the maintenance of sex", *Nature* 367: 554-7; 1994.
- Keightley P. D., Otto S. P., "Interference among deleterious mutations favours sex and recombination in finite populations", *Nature* 443: 89-92; 2006.
- Kondrashov A., "Deleterious mutations and the evolution of sexual recombination", *Nature* 336: 435-40; 1988.
- Otto S. P., Nuismer S. L., "Species interactions and the evolution of sex", *Science* 304: 1018-20; 2004.
- Szollosi G. J., Derenyi I., Vellai T., "The maintenance of sex in bacteria is ensured by its potential to reload genes", *Genetics* 174: 2173-80; 2006.

Altıncı Bölüm: Hareket

- Amos L. A., van den Ent F., Lowe J., "Structural/functional homology between the bacterial and eukaryotic cytoskeletons", *Current Opinion in Cell Biology* 16: 24-31; 2004.
- Frixione E., "Recurring views on the structure and function of the cytoskeleton: a 300 year epic", *Cell Motility and the Cytoskeleton* 46: 73-94; 2000.
- Huxley H. E., Hanson J., "Changes in the cross striations of muscle during contraction and stretch and their structural interpretation", *Nature* 173: 973-1954.
- Huxley H. E., "A personal view of muscle and motility mechanisms", *Annual Review of Physiology* 58: 1-19; 1996.
- Mitchison T. J., "Evolution of a dynamic cytoskeleton", *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B* 349: 299-304; 1995.
- Nachmias V. T., Huxley H., Kessler D., "Electron microscope observations on actomyosin and actin preparations from Physarum polycephalum, and on their interaction with heavy meromyosin subfragment I from muscle myosin", *Journal of Molecular Biology* 50: 83-90; 1970.
- OOta S., Saitou N., "Phylogenetic relationship of muscle tissues deduced from superimposition of gene trees", *Molecular Biology and Evolution* 16: 856-67; 1999.
- Piccolino M., "Animal electricity and the birth of electrophysiology: The legacy of Luigi Galvani", *Brain Research Bulletin* 46: 1113-18; 2005.
- Richards T. A., Cavalier-Smith T., "Myosin domain evolution and the primary divergence of eukaryotes", *Nature* 436: 1113-18; 2005.
- Swank D. M., Vishnudas V. K., Maughan D. W., "An exceptionally fast actomyosin reaction powers insect flight muscle", *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 103: 17543-7; 2006.
- Wagner P. J., Kosnik M. A., Lidgard S., "Abundance distributions imply elevated complexity of post-paleozoic marine ecosystems", *Science* 314: 1289-92; 2006.

Yedinci Bölüm: Görme

- Addadi L., Weiner S., "Control and Design Principles in Biological Mineralisation", *AngewChem Int Ed Engl* 3: 153-69; 1992.
- Aizenberg J., vd., "Calcitic microlenses as part of the photoreceptor system in brittlestars", *Nature* 412: 819-22; 2001.
- Arendt D., vd., "Ciliary photoreceptors with a vertebrate-type opsin in an invertebrate brain", *Science* 306: 869-71; 2004.

- Deininger W., Fuhrmann M., Hegemann P., "Opsin evolution: out of wild green yonder?", *Trends in Genetics* 16: 158-9; 2000.
- Gehring W. J., "Historical perspective on the development and evolution of eyes and photoreceptors", *International Journal of Developmental Biology* 48: 707-17; 2004.
- Gehring W. J., "New perspectives on eye development and the evolution of eyes and photoreceptors", *Journal of Heredity* 96: 171-84; 2005.
- Nilsson D. E., Pelger S., "A pessimistic estimate of the time required for an eye to evolve", *Proceedings of the Royal Society of London B* 256: 53-8; 1994.
- Panda S., vd., "Illumination of the melanopsin signaling pathway", *Science* 307: 600-604; 2005.
- Piatigorsky J., "Seeing the light: the role of inherited developmental cascades in the origins of vertebrate lenses and their crystallins", *Heredity* 96: 275-77; 2006.
- Shi Y., Yokoyama S., "Molecular analysis of the evolutionary significance of ultraviolet vision in vertebrates", *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 100: 8308-13; 2003.
- Van Dover C. L., vd., "A novel eye in 'eyeless' shrimp from hydrothermal vents on the Mid-Atlantic ridge", *Nature* 337: 458-60; 1989.
- White S. N., vd., "Ambient light emission from hydrothermal vents on the Mid-Atlantic ridge", *Geophysical Research Letters* 29: 341-4; 2000.

Sekizinci Bölüm: Sıcakkanlılık

- Burness G. P., Diamond J., Flannery T., "Dinosaurs, dragons, and dwarfs: the evolution of maximal body size", *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 98: 14518-23; 2001.
- Hayes J. P., Garland J., "The evolution of endothermy: testing the aerobic capacity model", *Evolution* 49: 836-47; 1995.
- Hulbert A. J., Else P. L., "Membranes and the setting of energy demand", *Journal of Experimental Biology* 208: 1593-99; 2005.
- Kirkland J. I., vd., "A primitive therizinosauroid dinosaur from the Early Cretaceous of Utah", *Nature* 435: 84-7; 2005.
- Klaassen M., Nolet B. A., "Stoichiometry of endothermy: shifting the quest from nitrogen to carbon", *Ecology Letters* 11: 1-8; 2008.
- Lane N., "Reading the book of death", *Nature* 448: 122-5; 2007.
- O'Connor P. M., Claessens L. P. A. M., "Basic avian pulmonary design and flow through ventilation in non-avian theropod dinosaurs", *Nature* 436: 253-6; 2005.

- Organ C. L., vd., "Molecular phylogenetics of Mastodon and Tyrannosaurus rex", *Science* 320: 499; 2008.
- Prum R. O., Brush A. H., "The evolutionary origin and diversification of feathers", *Quarterly Review of Biology* 77: 261-95; 2002.
- Sawyer R. H., Knapp L. W., "Avian skin development and the evolutionary origin of feathers", *Journal of Experimental Zoology* 298B: 57-72; 2003.
- Seebacher F., "Dinosaur body temperatures: the occurrence of endothermy and ectothermy", *Paleobiology* 29: 105-22; 2003.
- Walter I., Seebacher F., "Molecular mechanisms underlying the development of endothermy in birds (*Gallus gallus*): a new role of PGC-1 β ", *American Journal of Physiology Regul Integr Comp Physiol* 293: R2315-22, 2007.

Dokuzuncu Bölüm: Bilinç

- Churchland P., "How do neurons know?", *Daedalus* Kış 2004; 42-50.
- Crick F., Koch C., "A framework for consciousness", *Nature Neuroscience* 6: 119-26; 2003.
- Denton D. A., vd., "The role of primordial emotions in the evolutionary origin of consciousness", *Consciousness and Cognition* 18: 500-514; 2009.
- Edelman G., Gally I. A., "Degeneracy and complexity in biological systems", *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 98: 13763-68; 2001.
- Edelman G., "Consciousness: the remembered present", *Annals of the New York Academy of Sciences* 929: 111-22; 2001.
- Gil M., De Marco R. J., Menzel R., "Learning reward expectations in honeybees", *Learning and Memory* 14: 49-96; 2007.
- Koch C., Greenfield S., "How does consciousness happen?", *Scientific American*, Ekim 2007; 76-83.
- Lane N., "Medical constraints on the quantum mind", *Journal of the Royal Society of Medicine* 93: 571-5; 2000.
- Merker B., "Consciousness without a cerebral cortex: A challenge for neuroscience and medicine", *Behavioral and Brain Sciences* 30: 63-134; 2007.
- Musacchio J. M., "The ineffability of qualia and the word-anchoring problem", *Language Sciences* 27: 403-35; 2005.
- Searle J., "How to study consciousness scientifically", *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B* 353: 1935-42; 1998.
- Singer W., "Consciousness and the binding problem", *Annals of the New York Academy of Sciences* 929: 123-46; 2001.

Onuncu Bölüm: Ölüm

- Almeida A., Almeida J., Bolaños J. P., Moncada S., "Different responses of astrocytes and neurons to nitric oxide: the role of glycolytically-generated ATP in astrocyte protection", *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 98: 15294-99; 2001.
- Barja G., "Mitochondrial oxygen consumption and reactive oxygen species production are independently modulated: implications for aging studies", *Rejuvenation Research* 10: 215-24; 2007.
- Bauer, vd., "Resveratrol improves health and survival of mice on a high-calorie diet", *Nature* 444: 280-81; 2006.
- Bidle K. D., Falkowski P. G., "Cell death in planktonic, photosynthetic microorganisms", *Nature Reviews in Microbiology* 2: 643-55; 2004.
- Blagosklonny M. V., "An anti-aging drug today: from senescence-promoting genes to anti-aging pill", *Drug Discovery Today* 12: 218-24; 2007.
- Bonawitz N. D., vd., "Reduced TOR signalling extends chronological life span via increased respiration and upregulation of mitochondrial gene expression", *Cell Metabolism* 5: 265-77; 2007.
- Garber K., "A mid-life crisis for aging theory", *Nature* 26: 371-4; 2008.
- Hunter P., "Is eternal youth scientifically plausible?", *EMBO Reports* 8: 18-20; 2007.
- Kirkwood T., "Understanding the odd science of aging", *Cell* 120: 437-47; 2005.
- Lane N., "A unifying view of aging and disease: the double-agent theory", *Journal of Theoretical Biology* 225: 531-40; 2003.
- Lane N., "Origins of death", *Nature* 453: 583-5; 2008.
- Tanaka M., vd., "Mitochondrial genotype associated with longevity", *Lancet* 351: 185-6; 1998.

Dizin



A

açlık 166, 302, 304
Addadi, Lia 221, 363, 377
adenin 46, 345
adenosin trifosfat 34
aerobik kapasite 249, 253, 254,
255, 263, 264, 267, 354
aerobik kapasite varsayımı 264
ağaçlar 7, 78, 82, 100, 118, 124,
158, 174, 257
AIDS 143, 161
akciğer 155, 264, 267, 360
akıllı tasarım 351
aktin 182, 186, 187, 189, 190,
191, 192, 193, 194, 195,
196, 198, 199, 200, 202,
362
Aldini, Giovanni 179
alger 77, 81, 91, 108, 109, 118,
119, 122, 167, 192, 203,
238, 239, 315
ALISS 234
Alibardi, Lorenzo 258
Allen 100, 101, 103, 132, 345,
365, 374, 375
Alvin 23, 209
Alzheimer hastalığı 49, 276, 320
amigdala 300
amino asit 19, 20, 53, 54, 57, 59,
60, 61, 62, 64, 65, 117, 343
amip 112, 174
amonyak 19, 66
Antarktika 12, 355
antibiyotik 348

anti-depresan 285
antioksidan 102, 330
anti-psikotik 285
ApoE 320
ApoE4 320, 333, 358
aragonit 31
archaea 37, 374
Archaeopteryx 257
archosaur 254, 256, 258, 259,
267, 268
Arcimboldo, Guiseppe 239
Arendt, Detlev 232, 377
Aristoteles 178
Armstrong, Neil 23
Asara, John 256
Ascent of Man 339, 369
asetik asit 342
asetil fosfat 39
asit 19, 20, 24, 43, 53, 54, 57, 59,
60, 61, 62, 64, 65, 73, 117,
221, 342, 343
asteroit bombardımanı 20
astrosit 299, 333
atmosfer 14, 15, 79, 264, 382
ATP 34, 35, 36, 37, 39, 40, 41, 42,
43, 44, 68, 87, 90, 98, 99,
101, 103, 104, 111, 133,
187, 188, 189, 190, 191,
194, 248, 251, 252
Auschwitz 339
Avery, Oswald 53
azot 19, 29, 83, 269, 270, 271,
329
B
Bach, Johann Sebastian 193

bağışıklık hücreleri 112
 bağışıklık sistemi 200, 328, 349
 bağlanma 55, 65, 189
 Bakker, Robert 261
 bakteriler 7, 16, 17, 25, 31, 39, 43,
 50, 70, 71, 74, 78, 79, 81,
 82, 93, 98, 101, 102, 105,
 108, 109, 110, 111, 112,
 113, 114, 115, 121, 122,
 123, 124, 125, 126, 133,
 167, 170, 176, 198, 200,
 227, 238, 266, 311, 312,
 313, 314, 342, 346, 347,
 348, 357
 Barber, Jim 96, 346
 Barja, Gustavo 331, 360, 366
 Baross, John 25, 373
 Barton, Nick 164, 166
 basit göz 237, 238
 beden 145, 195, 203, 204, 245,
 246, 283, 288, 289, 315,
 324, 337
 Beethoven, Ludwig van 193
 Bell, Graham 157, 220, 352
 bencil gen 136, 157
 benlik 277, 280, 289, 347
 Bennett, Albert 248, 249, 250, 251
 beyin 116, 217, 246, 274, 278,
 280, 286, 288, 290, 292,
 300, 301, 304, 333, 355,
 356, 357
 bilinç 10, 12, 274, 275, 276, 277,
 278, 279, 283, 286, 287,
 289, 292, 294, 298, 299,
 301, 305, 369
 bitki 16, 80, 91, 112, 145, 176,
 177, 195, 238, 247, 271
 biyofilm 313
 Blackmore, Susan 284, 369
 Blagosklonny, Mikhail 328
 Blankenship, Bob 96, 366, 375
 Bosch, Hieronymous 24
 Bowman, William 181, 182, 183,
 189
 Brasier, Martin 93, 94
 Brown-Sequard, Charles 67

Brenner, Sydney 53
 Brinkley, John R. 310
 Bronowski, Jacob 339, 369
 Bythograea thermydron 211

C

Cairns-Smith, Graham 297, 298,
 300
 Campbell, Mrs. Patrick 348
 Capgras sendromu 281
 Carrell, Alexis 382
 Carroll, Lewis 160
 Cavalier-Smith, Tom 127, 169,
 170, 348, 376, 377
 Chalmers, David 278, 279, 297
 Churchill, Winston 350, 354
 cinsel olgunlaşma 336
 Ciona intestinalis 225
 Claessens, Leon 262, 263, 378
 Cokinos, Christopher 254
 Colbert, Edwin 355
 Consciousness Explained 370
 Copley, Shelley 64, 183, 366, 374
 Crichton, Michael 261
 Crick, Francis 17, 45, 46, 51, 52,
 53, 55, 56, 57, 58, 59, 62,
 65, 73, 183, 185, 276, 286,
 287, 291, 344, 369, 372,
 373, 374
 Crick, Odile 178, 349
 Crow, James 48

Ç

çekirdek 33, 59, 96, 110, 111,
 127, 128, 131, 132, 135,
 168, 277, 279, 294, 302
 çiçek 145, 146, 158, 204, 353
 çifte sarmal 63
 çiftleşme 295, 308
 çok hücreli organizmalar 314

D

damak 255
 Damasio 288, 289, 293, 369
 Darwin, Charles 8, 11, 12, 23,

115, 116, 118, 124, 149,
150, 152, 157, 160, 173,
184, 205, 213, 214, 215,
217, 315, 369, 371, 372,
Davis, Brian K. 59
De Duve, Christian 17, 370, 374
dejenerasyon 60, 166, 317, 333
Delaney, John 209, 210
demir 24, 26, 27, 30, 31, 33, 38,
44, 76, 77, 81, 82, 85, 98,
99, 102, 302, 320
denizanası 117
Dennett, Daniel 370
Denton, Derek 353, 370
deoksiribonükleik asit
deoksiriboz 343, 344
Derin Mavi 278, 356
Descartes, René 178, 274
Dhobzhansky, Theodore 335
Diamond, Jared 143, 271, 378
dinozor 244, 256, 259, 264
diyafram 255, 260, 261
DNA 5, 11, 12, 18, 19, 20, 22, 27,
29, 34, 44, 45, 46, 47, 48,
49, 50, 51, 52, 53, 54, 55,
63, 65, 67, 69, 70, 71, 72,
73, 74, 90, 91, 102, 110,
111, 117, 118, 121, 123,
124, 135, 136, 137, 139,
140, 183, 200, 221, 269,
270, 286, 329, 330, 334,
342, 343, 344, 348, 361,
374, 376
doğal seçim 8, 37, 99, 131, 132,
149, 165, 201, 205, 213,
278, 319
dolaşım sistemi 259
Doolittle 107, 348
Double Helix 52
Drosophila 188, 231, 363
Duncan, Isadora 348
duygu 288
dünya 1, 7, 16, 17, 18, 24, 33, 34,
44, 58, 66, 75, 76, 77, 81,
85, 92, 105, 118, 122, 143,
148, 149, 174, 175, 202,

204, 205, 267, 277, 278,
280
düzenleyici 14, 22, 140, 189
E
Eating the Sun 344, 372
Edelman, Gerald 289, 290, 291,
292, 300, 370
EEG 286, 357
efendi 229, 230, 252
Einstein, Albert 241
ekosistem 175
elektirik 19, 20, 21, 36, 42, 43, 84,
131, 133, 179, 180, 181,
185, 186, 194, 210, 228,
251, 282, 357
elektron 21, 30, 84, 85, 86, 87,
88, 89, 90, 95, 96, 97, 98,
101, 102, 103, 104, 105,
106, 109, 184, 185, 186,
191, 231, 297, 329, 341,
362, 363
elektron mikroskopisi 184, 185
Eliot, T. S. 287
Else, Paul 378
enfeksiyon 295, 312, 314
Entobdella soleae 352
enzim 12, 13, 72, 74, 123, 225,
312, 358
eşeysiz üreme 142
etobur 269, 270
evrim 12, 13, 14, 69, 115, 121,
123, 126, 140, 145, 155,
157, 176, 177, 190, 197,
204, 218, 223, 229, 273,
274, 309, 340, 348, 358,
369, 371

F

fagositoz 112, 113, 127, 128, 130,
134, 348
Falcarius utahensis 271
Falkowski, Paul 312, 366
farklılaşma 120, 125, 236, 258,
314

Felsenstein 164, 376
 Fisher, Ronald 152, 153, 157, 164
 fizik kanunları 309, 384
 Flagellum Unspun 351
 fosfat 39
 fosil 10, 29, 33, 80, 85, 92, 95,
 106, 114, 116, 118, 174,
 204, 216, 237, 253, 254,
 262, 263, 264, 352
 fosilleşme 204
 fosil yakıtlar 85
 fotosentez 12, 34, 75, 79, 82, 85,
 86, 87, 90, 91, 96, 97, 98,
 99, 132, 237, 238, 298
 fotosistem 86, 87, 89, 96, 97, 103,
 104, 345, 346
 Fotosistem I 86, 87, 90, 96, 97,
 98, 101, 103
 Fotosistem II 86, 87, 96, 97, 98,
 101, 102, 103, 104, 105,
 346
 Frankenstein 179
 Freeland, Stephen 62, 371, 374
 frengi 143
 Freud, Clement 241, 247, 354
 Friedman, David 322

G

Gaia 76
 Galapagos Yarığı 23
 Galileo 274
 Galvani, Luigi 179, 180, 184, 189,
 377
 Gamow, George 54, 55
 Gazzaniga, Michael 356
 geç harekete geçen 332, 333
 Gehring, Walter 229, 230, 239,
 363, 378
 genetik 11, 46, 47, 59, 62, 70,
 100, 109, 115, 119, 125,
 127, 129, 130, 142, 147,
 154, 157, 162, 163, 164,
 165, 166, 199, 231, 232,
 237, 252, 312, 314, 320,
 321, 322, 323, 343, 345,
 346

genom 14, 48, 51, 117, 123, 125,
 133, 136, 138, 147, 170,
 342
 genomik 14, 117, 342
 Gilgames 9, 309
 Giardia 158
 Gilbert, Melody 63, 294, 374
 Gingras, Gabby 294
 glikolitik değişim 333
 Goodsell, David 188, 362
 Gould, Stephen Jay 274, 370
 görme 7, 9, 12, 87, 205, 207, 212,
 214, 237, 280, 287, 290,
 321, 353
 gözbebeği 212
 guanin 46, 221, 223
 Guarente, Leonard 328

H

hafıza 278, 283, 292, 294, 322,
 347
 Hallam, Arthur 173
 Hamelin Göleti 93, 361
 Hameroff, Stuart 298, 299
 Hamilton, Bill 157, 160, 161, 162,
 376
 hareket 8, 9, 11, 12, 28, 42, 63,
 108, 111, 133, 174, 175,
 176, 177, 178, 179, 183,
 187, 193, 194, 195, 196,
 198, 199, 200, 202, 209,
 213, 242, 251, 266, 282,
 309, 313, 314, 323, 327,
 351, 357
 Harman, Denham 329, 330, 331
 hastalık 142, 143, 230, 319, 321,
 359
 hayat ağacı 107, 119, 122, 362
 hayatın kökeni 1, 18, 20, 23, 25,
 26, 27, 32, 298
 Hegemann, Peter 237, 378
 Helmholtz, Hermann von 181
 hemofili 149
 hemoglobin 183, 187, 201, 224,
 260
 HIV 71, 74, 143, 348

hidrojen 19, 22, 24, 25, 26, 29,
31, 32, 33, 35, 37, 40, 42,
59, 75, 76, 82, 83, 84, 85,
97, 98, 99, 101, 103, 114,
208, 265, 266, 341, 347
hidrojen hipotezi 347
hidrojen sülfür 24, 25, 26, 29, 82,
85, 97, 98, 99, 101, 208,
266
Hill, Robin 86, 87, 164, 361, 375
Hodgkin, Dorothy 185
homeotermi 242
Homeros 277, 308
hominid 116, 274
Howlin' Wolf 354
Hoyle, Fred 17, 20
Hubel, David 285
Hulbert, Tony 378
Huntington korası 319
Hurst, Lawrence 62, 374
Huxley, Andrew 362, 366, 377
Huxley, Hugh 191, 192, 344
Huxley, T. H. 183, 184, 185, 186
hücre 11, 12, 44, 47, 48, 69, 71,
73, 109, 111, 112, 113, 119,
121, 122, 123, 126, 127, 128,
130, 131, 132, 133, 134, 135,
136, 137, 139, 140, 142, 146,
151, 159, 168, 169, 170, 189,
191, 192, 193, 194, 195, 196,
198, 199, 200, 201, 202, 212,
219, 228, 233, 238, 312, 314,
315, 316, 317, 327, 330, 333,
334, 337, 346, 347, 349, 351,
352, 354, 359, 362, 371
Hydra 317

I-I

In Memoriam 173
iç organlar 251, 253
ilksel çorba 20, 59
ilksel duygular 295, 304
İlyada 276, 277
insan genomu 47, 49, 136
İnsan Genomu Projesi 14
insülin 324, 325, 327, 329

intron 136, 238
iskelet 182, 189, 190, 192, 198,
201, 254, 262

J

James, William 18, 45, 48, 183,
296, 297, 357
Jaynes, Julian 276, 277
Johnson, Tom 322
Jones, Steve 225, 370
Jurassic Parc 257, 261
Jüpiter 18

K

Kaeberlein, Matt 328
kalıtım 227
kalsit 219, 220, 221, 222, 363
kalsiyum 43, 104, 105, 181, 189,
190, 219, 220, 221, 222,
279, 346, 357, 361
Kambriyen Devri 231
kamçı 237, 351
kanser 48, 317, 318, 321, 328,
336, 345, 359
karaciğer 251, 253
Karadeniz 77
karbon 16, 37, 38, 80, 81, 83, 84,
92, 94, 99, 106, 243, 244,
270, 372
karbondioksit 19, 29, 35, 38, 41,
43, 60, 76, 79, 108, 244,
265, 266, 267, 271, 314,
344, 347
karbonmonoksit 26
karides 208, 209, 210, 213, 223,
362
karmazitlik 8, 20, 68, 79, 100,
113, 140, 175
Kasparov, Gary 278, 356,
Kayıp Kent 24, 30, 31, 32, 37, 361
Kendrew, John 52, 183, 350
Kennedy, Brian 328
keratin 258
kertenkele 245, 246, 251
Keyhüsrev 307

kıkırdak 77, 192, 362
 Kılıçlar Mağarası 221
 Kırmızı Kraliçe 160, 162, 163,
 164, 166, 176, 270
 kıyma 17, 21, 83, 89, 107, 340
 Kirkwood, Tom 324, 358, 371
 kitlesel tükeniş 265
 Klaassen, Marcel 268, 269, 270,
 271
 kladistik 256, 257
 klon 59, 146, 148
 klonlama 142, 156, 166, 386
 klorofil 75, 89, 98, 99, 102, 103
 kloroplast 86, 90, 112, 239
 Koch, Christof 284, 286, 287, 291,
 292, 366, 371
 kodon 54, 55, 61, 343
 kolajen 78, 256, 257
 Kondrashov, Alexey 155, 156,
 157, 376
 Koonin 70, 71, 72, 135, 136, 139,
 366, 374, 375
 Koteja, Pavel 249, 366
 kök hücre 337
 kömür 80, 265, 266
 Kömür Çağı 80, 81
 köpek 102, 217, 287
 Krebs, Hans 34, 35, 36, 37, 38, 39,
 40, 42, 60
 Krebs döngüsü 34, 35, 36, 37,
 40, 42
 kristalin 223, 224, 226
 kristalografi 197, 198, 199
 kromozom 47, 48, 150, 151, 164,
 165, 168, 169, 170, 342
 kuantum mekanigi 274
 kurbaga 179, 184
 kuş 116, 145, 246, 250, 258, 331
 kükürt 85, 156
 küresel ısınma 84, 106, 265

L

Land, Michael 216, 362, 366, 371
 Lankester, Ray 161
 larva 211, 225, 308
 Leeuwenhoek, Anthony van 178,

179, 181, 238
 levha tektonigi 355
 Levi, Primo 82, 83, 84, 90, 371
 Life Itself 58, 369
 lignin 81
 Linnaeus, Carolus 107, 108, 225
 lipid 60, 168, 354, 355
 Lively, Curtis 200
 Lively 163, 376
 LUCA 34, 42

M

magma 16, 23, 28
 Majungatholus atopus 262, 264
 makinavit 30
 Making of Memory 287, 372
 manganiz 102, 103, 104, 105,
 106, 346, 361
 mantarlar 77, 79, 81, 109, 112,
 118, 122, 167, 169, 192,
 203, 322
 Margulis, Lynn 123, 128, 202, 371
 Mars 15, 76, 79, 82, 311, 342
 Martin, Bill 37, 38, 40, 42, 43, 44,
 71, 72, 93, 128, 135, 136,
 139, 347, 362, 365, 371,
 373, 374, 375
 Matrix, The 281
 Maynard Smith, John 155, 157,
 372
 Mayow, John 178
 mayoz 150, 151, 158, 170
 Mayr, Ernst 123
 Medawar, Peter 272, 318, 319,
 321, 322, 323, 332
 memeli 158, 245, 246, 250, 251,
 254, 255, 263
 Mendel, Gregor 149, 150, 372
 mercek 206, 207, 209, 215, 216,
 217, 218, 219, 223, 224,
 226, 233, 239, 353
 metabolik hız 247, 250, 354
 metabolizma 33, 246, 255, 268,
 354, 355
 metan 19, 66, 73, 76, 209, 265,
 266, 342

meyve sineği 188, 229, 363
 Mısırlılar 301
 Microraptor 257
 mikroskopi 383
 mikrotübül 112
 Miller, Ken 18, 19, 29, 351
 Mitchell, Peter 42
 Mitchison, Tim 200, 377
 mitokondriler 62, 111, 127, 134,
 158, 169, 194, 248, 251,
 252, 316, 317, 330, 334,
 348
 mitoz 169, 170
 miyofibril 179
 miyoglobin 183, 350
 molekül 7, 20, 21, 22, 38, 40, 42,
 60, 88, 89, 98, 120, 226,
 228, 327, 342
 Moncada, Salvador 333, 366
 Morowitz, Harold 36, 64, 373, 374
 Morton, Oliver 344, 372, 387
 motor proteinler 198
 Mozart, Wolfgang Amadeus 142,
 193
 MRI (magnetic resonance ima-
 ging / manyetik rezonans
 görüntüleme) 303, 363
 multiple skleroz 359
 Musacchio, Jose 301, 302, 366
 mutasyon 48, 49, 57, 103, 120,
 131, 152, 153, 154, 155,
 156, 164, 165, 167, 169,
 258, 322, 323, 347, 349
 Müller, Miklós 153, 154, 155, 163,
 164, 347, 371, 375

N

NAD (nikotinamid adenin dinük-
 leotid) 358
 NADPH (nikotinamid adenin di-
 nükleotid fosfat, indirgen-
 miş biçimi) 89, 90, 97, 345
 nehir körüğü 161
 Neisseria gonorrhoea 346
 nektar 145, 304
 Nietzsche, Friedrich 143, 229

nikel 38
 Nilsson Dan-Eric 215, 216, 218,
 362, 363, 371, 378
 Nobel sperm bankası 141
 noktasal mutasyon 57
 Nolet, Bart 268, 269, 270, 271,
 378
 Norwich, John Julius 31
 notilus 215
 nöron 206, 280, 285, 286, 287,
 288, 289, 290, 291, 292,
 293, 301, 304, 333, 357
 nükleotid 49

O

O'Connor, Patrick 262, 263, 378
 oksidan 344
 oksijen 9, 15, 25, 26, 31, 73, 75,
 76, 77, 78, 79, 80, 81, 82,
 83, 84, 85, 89, 91, 93, 95,
 104, 105, 106, 127, 130,
 131, 201, 206, 217, 242,
 248, 249, 250, 251, 259,
 260, 265, 266, 267, 272,
 289, 311, 329, 331, 341,
 344, 346, 347, 361, 371
 omurgalı 209, 225, 226, 232, 233,
 237, 238
 omurgasız 231, 232, 233, 238
 Oota, Satoshi 190, 377
 Ophiocoma wendtii 220, 363
 opsin 235, 236, 237, 377
 Origin of Species, The 369
 otobur 254, 269, 270, 271
 Otto, Sarah 164, 166, 366, 376
 Out of Thin Air 267, 372
 ozon 75, 76, 101, 265, 266

Ö

ökaryot 110, 111, 112, 113, 115,
 117, 118, 119, 120, 121,
 124, 125, 126, 127, 128,
 129, 130, 132, 133, 134,
 135, 136, 137, 138, 139,
 140, 148, 168, 169, 170,

196, 198, 199, 201, 316,
317, 331, 342, 346, 348,
349, 351, 358, 362, 37

ölçek 43

P

Panda, Satchin 232, 378
Papa II. Jean Paul 273
parazit 158, 161, 162, 163, 342,
352
Parker, Andrew 204, 216, 372
Pasifik somonu 324, 358
PCR (polymerase chain reaction
/ polimeraz zincirleme
tepkime) 67
Pelger, Suzanne 215, 216, 218,
378
Penrose, Roger 298, 299
Periodic Table, The 371
Permien tükenişi 175, 176, 219,
265, 272
Perutz, Max 52, 183, 184, 350
petrol 7, 80, 329
Physarum polycephalum 192,
362, 377
pigment 86, 97, 206, 209, 233,
238
Pinker, Steven 279
pirüvat 38, 60, 64
Platynereis 231, 232, 237
poikilotermi (bkz. sogukkanlılık)
242
polimerleşme 191, 199
porfirin 98, 99
Primordial Emotions, The 370
prion 351
prokaryot 110, 111, 122, 125,
128, 129, 130, 134, 140,
342, 362
proton 42, 43, 44, 252
protozoa 108, 238, 239
Prum, Richard 355
pterosaur 259
Pullman, Philip 357

R

Ramachandran, VS 282, 356, 372
rapamisin 328
Red Queen, The 349, 372
resveratrol 327, 328
retina 206, 208, 212, 213, 217,
239, 359
retinal 206, 232, 235, 236, 359
retrovirüs 72
ribonükleik asit 73
riboz 343, 344
ribozom 55, 121, 343
ribozomal RNA 122, 125, 129,
346
Ridley, Mark 58, 156, 349, 372
RNA (ribonükleik asit) 20, 22, 27,
32, 37, 55, 56, 57, 63, 64,
65, 66, 67, 68, 69, 70, 71,
72, 73, 74, 121, 122, 123,
125, 129, 136, 137, 138,
139, 343, 344, 346, 362,
374
Robertson, Alan 164
Rose, Steven 287, 372
Ruben, John 248, 249, 250, 251,
255, 261, 263
Russell, Mike 22, 27, 28, 29, 30,
31, 32, 36, 37, 38, 40, 42,
43, 44, 67, 71, 104, 105,
365, 373, 374, 375

S

Sacks, Oliver 281
Saitou, Naruya 190, 377
salinum (bkz. gama sahnımı) 293,
357
salyangoz 93, 241
Sanger, Fred 54
sarkomer 179, 182
Schopf, Bill 92, 94, 95
Schubert, Franz 143
Schumann, Robert 143
Seebacher, Frank 252, 366
seks 100, 141, 144, 145, 148, 156,
160, 166, 167, 168, 169,

204, 295, 342, 349
 Selfish Gene, The 348, 370
 serbest radikal 38, 329, 331, 332, 333, 334
 serotonin 284
 serpantin 28
 Shark Bay (Köpekbalığı Körfezi) 361
 Shaw, George Bernard 141, 142, 143, 144, 348
 Shelley, Mary 64, 179, 366, 382
 Shi, Yongsheng 237, 378
 Shimeld, Sebastian 225
 Shock, Everett 32
 sıcakkanlılık 12, 244, 245, 246, 247, 260, 264, 270, 272, 385
 sıçrayan (transpozon) 136, 137, 138, 139, 147, 167, 169
 sıçrayan gen 136, 138
 sıkıcı milyar 82
 SIRT-1 326, 327, 328, 329, 358, 359
 sıtma 142, 161, 201
 simbiyoz 202
 sinaps 290, 298, 337
 Sinclair, David 327
 sinekkuşu 115, 144
 Singer, Wolf 286, 291, 292
 sinir sistemi 217, 225
 sirke 23, 38, 39
 sitoplazma 194
 siyah baca 341, 361
 siyanobakteriler 84, 91, 101, 238, 311, 316
 Smith, Eric 64, 127, 155, 157, 169, 170, 297, 298, 300, 348, 369, 372, 373, 374, 376, 377
 Social Brain, The 356
 sodyum 43, 181, 357
 Solon 307
 soluma 248, 255, 260, 262, 263, 298, 331, 347, 350
 solunum yolları 255, 263, 264, 267

soma 315, 337, 358, 382
 Son Evrensel Ortak Ata (Last Universal Common Ancestor / bkz. LUCA) 34
 sperm 48, 141, 146, 150, 308
 Sperry, Roger 285, 356
 Spiegelman, Sol 68
 spor 320
 stegosaurus 244
 stromatolit 101
 susuzluk 295, 301, 304
 sülfat 76, 265
 sülfür 24, 25, 26, 29, 30, 31, 33, 38, 44, 76, 77, 82, 85, 97, 98, 99, 101, 178, 208, 226, 266, 341, 342
 sürüngen 243, 250, 254, 260, 272
 Swammerdam, Jan 178
 Szent-György Albert 341

Ş

şehvet 177, 295, 304
 şeker 49, 84, 87, 97, 98, 99, 103, 322, 329, 354

T

Tanaka, Masashi 334, 335
 Tanrı 107, 108, 142, 173, 273, 276, 278, 284, 300, 340, 351
 tasarım 8, 62, 205, 227, 351
 tembel hayvan 11
 Tennyson, Alfred 173, 308
 termodinamik 10, 21, 22, 26, 27, 32, 33, 36, 39, 40, 341
 ters transkriptaz 74
 timin 346, 343
 timsah 245, 258, 260, 261
 Tithonus 308, 309, 310, 319, 322
 TOR 327, 328, 329, 330, 334, 358, 359
 Trichodesmium 311
 trilobit 216, 219, 222, 363
 Trivers, Robert 157, 161
 tükenme 115, 208

türler 52, 118, 148, 158, 160, 161,
174, 175, 176, 208, 219,
227, 295, 359

Tyrannosaurus rex 256

U

urasil 73, 343

uygunluk 129, 154, 155, 163, 165

V

Van Dover, Cindy 208, 209, 234,
235, 378

Vellai, Tibor 376

Velociraptor 257

Venüs 75, 143

Verne, Jules 208

virüs 46, 71, 313

Volta, Alessandro 180

Volvox 237, 238, 239, 315

W

Wagner, Peter 175, 197

Wagner, Richard 377

Wald, George 141

Walker, Richard 87, 88, 361, 375

Warburg, Otto 359

Ward, Peter 267, 366, 372

Watson, James 45, 46, 51, 52, 53,
55, 63, 73, 183, 344, 374

Wedgewood, Emma 149

Weiner, Stephen 221, 363, 377

Weismann, August 152, 315, 318,
323, 358, 376

Wiesel, Torsten 285

Williams, George C. 157, 159,
164, 319, 333

Wodehouse, P. G. 215

Woese, Carl 121, 122, 123, 124,
125, 129, 346

Wright, Alan 332

X

X-ışını 13, 95, 183, 184, 185, 186,
197, 361, 386

X-ışını kristalografisi 183, 184,
197, 386

X kromozomu 165

Y

Yachandra, Vittal 105, 375

yağ asitleri 354

yalancı ayak 194

yalıtım 245, 259, 277

Yarus, Michael 343

yaşa bağlı maküler dejenerasyon
359

yaşlanma 317, 318, 321, 323, 328,
330, 332, 334, 336, 337

yeniden kombinasyon 349

yılan 28, 29, 48, 220, 221, 269

Y kromozomu 148

Yokoyama, Shozo 237, 378

yumurta (oosit) 47, 48, 63, 69,
111, 146

Z

zaman 10, 13, 16, 17, 19, 22, 26,
27, 31, 37, 40, 43, 45, 49,
50, 54, 68, 69, 72, 78, 79,
82, 85, 86, 87, 90, 96, 97,
98, 102, 106, 110, 113,
114, 115, 116, 117, 118,
124, 125, 126, 127, 130,
133, 137, 139, 143, 144,
149, 155, 157, 158, 161,
163, 166, 173, 174, 176,
185, 189, 191, 193, 197,
201, 204, 207, 208, 217,
223, 228, 239, 241, 243,
247, 256, 257, 270, 271,
276, 283, 284, 293, 296,
300, 302, 304, 309, 311,
312, 314, 315, 321, 324,
326, 329, 332, 339, 340,
347, 350, 356, 357, 358

Zanno, Lindsay 272

zar 42, 86, 110, 111, 133, 181,
195, 251, 300, 347

zombi 277

zor problem 297, 300

Z şeması 86, 87, 88, 103



2010 Royal Society En İyi Bilim Kitabı Ödülü

“Yaşamın Yükselişi duru ve acı bir dille yazılmış bir kitap. Nick Lane önümüze basbayağı bilim koyarak bizi zorlamaktan korkmamış, öyle bir açıklamış ki bizler de kendimizi hayatın gizemlerini ortaya çıkaran bilim insanları gibi hissettik. Bilim yazınının okurlara üstünlük taslamaması, onların bilimsel düşünme biçimlerini geliştirmelerine, dünyaya uygulamalarına katkıda bulunması gerekir, bu harika ve eğlenceli kitap da bunun bir örneği.” *Maggie Philbin, Royal Society Bilim Kitapları 2010 Ödülleri Jürisi Başkanı*

“Biyolojinin en derin, en önemli fikirlerinden bazılarını yapılmış, orijinal, huşu uyandıran, insanın nefesini kesen bir yolculuk.” *New Scientist*

DNA nereden gelir? Bilinç nedir? Göz nasıl evrilmiştir? Nick Lane yeni bilimsel bilgilerle dolu bir hazine sandığını açarak evrim tarihini seksten, sıcakkanlılığa ve ölüme on büyük icatla yeniden kuruyor, doğanın dehasını çarpıcı bir anlatıyla ortaya koyuyor.

“Lane çok nadir bulunan o türe mensup: Koskoca bir alanın kuşbakışı bir manzarasını sunabilmenin yanı sıra, kendisinin çok ilginç fikirlerini de aktarabiliyor.” *Carl Zimmer*

“Hayatın gizemleri, nasıl doğduğu, nasıl işlediği, şeylerin neden öldüğü, bilincin nasıl evrildiği hakkında büyüleyici bir dille yazılmış bir anlatı. Muhteşem bir okuma deneyimi sunuyor ayrıca büyük evrimsel bulmacalar hakkındaki bugünkü bilimsel düşünceleri, gerçekten kavramamızı sağlıyor.” *Ian Stewart*

