

Keyifli Okumalar Dileriz

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

RESMİ WEB SİTEMİZ

<https://rantey.org>

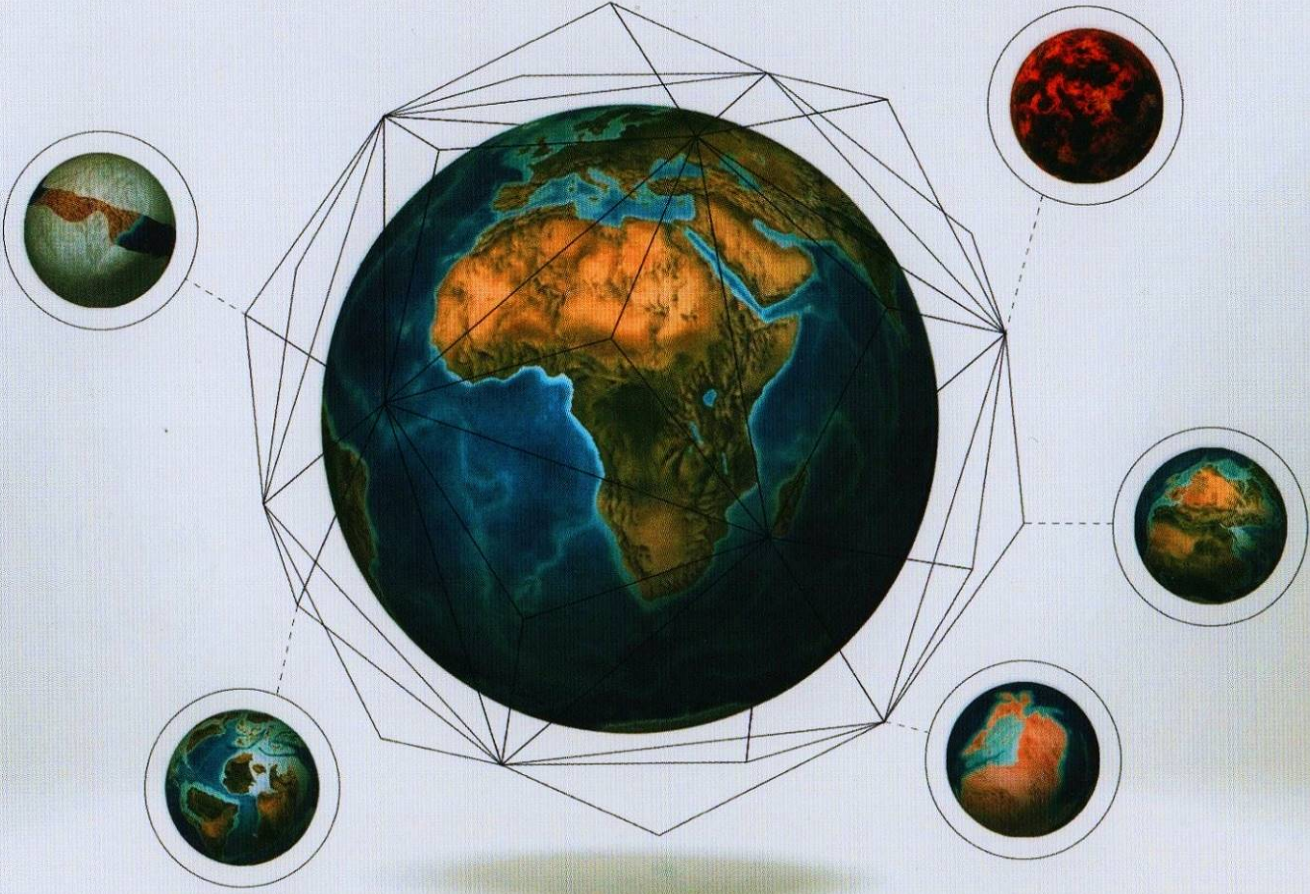
Yedek ve Duyuru Kanallarımız

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>

ROBERT M. HAZEN

DÜNYA'NIN ÖYKÜSÜ



YILDIZ TOZUNDAN
CANLI GEZEGENE
İLK 4,5 MİLYAR YIL

"BÜYÜLEYİCİ BİR ÖYKÜ" - Bill McKibben

Robert M. Hazen

Robert M. Hazen George Mason Üniversitesi'nde Clarince Robinson Jeoloji Profesörü ve Carnegie Enstitüsü Jeofizik Laboratuvarı'nda kıdemli bir bilim insanıdır. Çok satan Science Matters'ın da dâhil olduğu sayısız kitabın yazarı olan Hazen, eşiyle birlikte Glen Echo, Maryland'de yaşamaktadır.

Gökçe Metin

Gökçe Metin, lisans derecesini Ege Üniversitesi İngiliz Dili ve Edebiyatı Bölümü'nden, yüksek lisans derecesini Dokuz Eylül Üniversitesi Mütercim-Tercümanlık Bölümü İngilizce Mütercim-Tercümanlık Anabilim Dalı'ndan aldıktan sonra, Boğaziçi Üniversitesi Çeviribilim Bölümü'nde doktora ders aşamasını tamamladı. Lisans döneminin son yılında, TÖMER İzmir Şubesi'nin düzenlediği Ulusal Genç Çevirmenler Yarışması'nda Feyza Hepçilingirler'in "Evlerin Sakınımı" öyküsünün İngilizce'ye çevirisiyle birincilik ödülü aldı. Yayınlanan kurgusal ve kurgu dışı kitap çevirileri, öykü ve şiir çevirileri bulunmaktadır.



Dünya'nın Öyküsü

Robert M. Hazen

Özgün Künye

The Story of Earth

Copyright © Robert M. Hazen, 2012

© Redingot Kitap, 2018

Türkçe Çeviri © Gökçe Metin, 2018

Yayına Hazırlayan: Ahmet Yurtkul

Yayın Danışmanı: Murat Saraçoğlu

Editör: Hulusi Güven

Kapak Tasarım: Kutan Ural (www.kutanural.com)

İç Tasarım: Adem Şenel

1. Baskı, Mayıs 2018, İstanbul

ISBN: 978-605-67271-8-4

Sertifika No: 33371

Bu kitabın Türkçe yayın hakları, Anatolia Telif Hakları Ajansı aracılığıyla William Morris Endeavor Entertainment, LLC'den alınmıştır. Yayıncının izni olmaksızın alıntı yapılamaz ve çoğaltılamaz.

Redingot Kitap, Ekim Film Prodüksiyon San. ve Tic. Ltd. Şti.'nin tescilli markasıdır.

Baskı ve Cilt: Berdan Matbaası

Davutpaşa Cad. Güven İş Merkezi

C Blok. No: 215/216 Topkapı/ İstanbul

Tel: 0 212 613 1112 Sertifika No: 12491



Kuloğlu Mah. Gazeteci Erol Dernek Sok. No:17/8

Beyoğlu/ İstanbul Tel: 0 212 403 1277

www.redingotkitap.com / info@redingotkitap.com

DÜNYA'NIN ÖYKÜSÜ

*Yıldız Tozundan,
Canlı Gezegene İlk 4,5 Milyar yıl*

ROBERT M. HAZEN

Çeviren
Gökçe Metin

Dünya'nın Öyküsü'ne Övgü

Kirkus Reviews 2012 en iyi 25 kurgu dışı eser arasındadır.

“Hazen konusuna duyduğu bulaşıcı heyecanla, okuru Dünya'nın tanımlayıcı anlarıyla tanıştırıyor... Ve Dünya'nın jeolojik ve biyolojik geçmişleri arasındaki etkileşimin anlaşılmasının gezegenimizdeki yaşamın geleceğini öngörmemize ve bunun için hazırlanmamıza yardımcı olabileceğini iddia ediyor.”

-Saron Yitbarek, *Discover*

“Dünya'nın kökenlerine dair, pek çok kişisel dokunuş içeren, parlak bir tarzda yazılmış büyüleyici, yeni bir kuram... Hazen Dünya'nın canlı ve cansız alanlarının geçtiğimiz dört milyar yıl boyunca birlikte geliştiğine ilişkin şaşırtıcı kanıtlar sunuyor.”

-*Kirkus Reviews* (yıldızlı eleştirisi)

“Özlü ve renkli... Son araştırmalardan yola çıkan ve astrobiyoloji alanındaki gelişmelerden etkilenen Hazen, gezegenimizin iç içe geçmiş canlı ve cansız alanlarının büyüleyici öyküsünü anlatmak için radikal bir noktada duruyor.”

-Birger Schmitz, *Nature*

“Canlı ve etkili... Hazen anlatacak harika bir öyküsü olan usta bir hikâye anlatıcısı... Elementlerin yıldızlarda doğuşundan Dünya'mızın gelecekteki yaşanabilirliğine ilişkin meditasyonlara kadar son derece kapsamlı, coşkulu, heyecan verici bir hikâye... Dünya'nın tarihiyle yeni tanışan herkes Hazen'in anlatımında bir ilham bulacak.”

-A.D. Anbar, *Science*

“Robert Hazen'ın jeolojik ve biyolojik tarih tezinin doğruluğunu değerlendirecek yetkinlikte değilim fakat tek bildiğiniz şey, konunun eski ölü (!) kayalarla ilgili oluşuysa bunun tahmin edebileceğinizden çok daha canlı, büyüleyici bir öykü olduğu değerlendirmesini yapabilecek yetkinliğe sahibim.”

-Bill McKibben, *Eaarth: Making a Life on a Tough New Planet*'ın yazarı

“Hazen bizi en büyük turlardan birine çıkarıyor –gezegenimizin 4,5 milyar yıllık tarihinin keşif turuna. Dünya kabuğunun atomlarından vücutlarımız, yaşayan bütün bir Dünya ve bu heyecan verici kitap doğuyor. Hazen’ı okuduğunuzda Dünya’yı ve yaşamı artık aynı şekilde görmeyeceksiniz.”

-Neil Shubin, paleontolog ve *İçimizdeki Balık*’ın yazarı

“Sıra dışı ölçüde okunabilir (ve) okur dostu... Çevreyle ilgilenen bilim müptelaları ve okurlar Hazen’in argümanlarını inandırıcı ve Dünya’nın çalkantılı tarihine ilişkin eleştirisini büyüleyici bulacaktır.”

-Carl Hays, *Booklist*

Dünyanın Öyküsü Dünya’yı görme biçiminizi değiştirebilecek o nadir bulunan kitaplardan. Hazen, geniş bir zaman dilimini ve bilgiyi yeni, keyifli bir düzyazıda sentezleyerek gerçekten de gezegenimizi bir öyküye, ikna edici bir öyküye dönüştürüyor. Hazen’ı okurken bu galaktik evdeki yerimize ilişkin yeni bir bağlam duygusuyla baş başa kaldım.”

-Charles Wohlforth, *The Fate of Nature* ve *The Whale and The Supercomputer*’ın yazarı

“Merak uyandıran, iyi anlatılmış bir öykü... (Hazen’in) Dünya’nın eziyet edilmiş bölgelerine ilişkin canlı betimlemeleri oldukça keyifli, tıpkı Dünya’mızın kesin yaşını ve uzayın genişliğini aktarırken gösterdiği Carl Sagan benzeri beceri gibi. Fantastik, heyecan verici bir okuma.”

-Michael Marshall, *New Scientist*

“Milyarlarca yıllık jeolojik evrimi tek bir kitaba tıktırmak ürkütücü bir güçlük fakat bu bir jeofizikçi olan Hazen’in görkemli biçimde eriştiği bir nokta.”

-Sid Perkins, *Science News*

•

“Hazen unutulmaz bir öykü anlatmak için çeşitli bilimsel disiplinleri bir araya getirerek, derinlemesine erişilebilir bir kitapta Dünya’nın ve yaşamın kökenlerini aydınlatıyor.”

-*Publishers Weekly*

“Hazen’in bilimi herkesin anlayabileceği şekilde açıklamak konusunda bir yeteneği var ve jeoloji, kimya ve fizik alanlarında minimum düzeyde kavrayışı olan okurlar dahi bu kitabı merak uyandırıcı bulacak.”

-Nancy R. Curtis, *Library Journal*

Gregory'ye:

Değişim gelecek;

yeter ki sen ona uyum sağlayacak bilgeliğe ve cesarete sahip ol

İçindekiler

Giriş / 1

Birinci Bölüm

Doğuş / 9

İkinci Bölüm

Büyük Darbe / 35

Üçüncü Bölüm

Kara Toprak / 57

Dördüncü Bölüm

Mavi Dünya / 81

Beşinci Bölüm

Gri Dünya / 107

Altıncı Bölüm

Canlı Dünya / 133

Yedinci Bölüm

Kırmızı Dünya / 161

Sekizinci Bölüm

“Sıkıcı” Milyar / 189

Dokuzuncu Bölüm

Beyaz Dünya / 215

Onuncu Bölüm

Yeşil Dünya / 241

On Birinci Bölüm

Gelecek / 267

Epilog / 293

Teşekkür / 297

Dizin / 301

1 **Doğuş Dünya'nın Oluşumu**

2 **Büyük Darbe Ay'ın Oluşumu**

3 **Kara Toprak İlk Bazalt Tortusu**

4 **Mavi Dünya Okyanusların Oluşumu**

5 **Gri Dünya İlk Granit Kabuk**

6 **Canlı Dünya Yaşamın Kökenleri**

7 **Kırmızı Dünya Fotosentez ve
Büyük Oksitlenme Olayı**

Hadean Devir

Arkeyan Devir

0 **DÜNYA'NIN YAŞI** (milyarlarca yıl) 1

2

← **BÜYÜK PATLAMA, 13,7 MİLYAR YIL ÖNCE**

II Gelecek Değişen Dünya Senaryoları

10 Yeşil Dünya Kara Biosferinin Yükselişi

9 Beyaz Dünya Kartopu-Sera Döngüsü

8 “Sıkıcı” Milyar Mineral Devrimi

Proterozoik Devir

Fanerozoik Devir

3

4

4.567

OYUN SONU, BUGÜNDEN 5 MİLYAR YIL SONRA →

DÜNYA'NIN ÖYKÜSÜ



Giriş

Yirminci yüzyılın en çarpıcı görüntülerinden biri, 1968 yılında Ay'ın çevresinde seyahat eden bir gezginin çektiği Dünya'nın doğuşunun fotoğrafıdır. Dünya'mızın ne kadar önemli ve özel olduğunu uzun süredir biliyoruz: Dünya okyanuslarca suyun, oksijeni bol bir atmosferin, yaşamın olduğu bilinen tek gezegendir. Ancak ayın düşman görünümü, uzayın donuk siyah boşluğu ve mavi üzerine beyaz desenli davetkâr evimiz arasındaki nefes kesici ölçüde şiddetli karşıtlığa çoğumuz hazır değildik. Bu uzak bakış açısından Dünya yalnız, küçük ve hassas fakat aynı zamanda bugüne dek göklerde görülen diğer tüm objelerden daha güzeldir.

Ana gezegenimiz anlaşılır biçimde bizi büyüler. İsa'nın doğumundan iki yüzyıldan daha fazla bir zaman öncesinde, bilge Yunan filozof Kireneli Eratosthenes, Dünya'da belgelenen ilk deneyi yürüttü. Dünya'nın çevresinin ustalıklı biçimde ölçümünü gölgelerin basit gözlemi üzerine temellendirdi. Mısır'ın Syene kasabasında, yaz gündönümü öğle vaktinde, Güneş'in tam tepede olduğunu gözlemledi. Dikey bir direğin hiç gölgesi olmuyordu. Buna karşılık aynı gün, aynı zamanda, yaklaşık 800 kilometre kuzeyde bulunan İskenderiye kıyı şehrinde benzer şekilde duran bir direk çok az gölge bırakıyor, dolayısıyla Güneş'in bu bölgede tam olarak tepede olmadığını ortaya koyuyordu. Erathosthenes Dünya'nın yuvarlak olduğu sonucuna varabilmek için Yunan önceli Öklid'in geometrik teoremlerini uyguladı ve yaklaşık olarak 40.230 kilometrelik bir çevresi olması gerektiğini hesapladı; bu Ekvator çevresinin yerleşik modern değeri olan 40.075 kilometreye oldukça yakındı.

Yüzyıllar boyunca, pek azı saygın isimlere sahip olan fakat büyük çoğunluğu tarih içinde kaybolmuş başka binlerce bilim insanı, evimiz olan gezegen üzerinde incelemeler yapmış, fikir üretmiştir. Dünya'nın nasıl oluştuğunu, göklerde nasıl hareket ettiğini, neden yapıldığını ve nasıl işlediğini sormuşlardır. Her şeyin ötesinde de bu bilim insanları hareketli gezegenimizin nasıl geliştiğini, nasıl canlı bir Dünya hâline geldiğini merak etmişlerdir. Bugün, hatırı sayılır ve gitgide artan bilgimiz ve insan teknolojisinin harikaları sayesinde, Dünya hakkında kadim filozofların kavrayabileceğinden daha fazla şey biliyoruz. Elbette her şeyi bilmiyoruz fakat kavrayışımız zengin ve derin.

İnsanlığın doğuşundan bu yana Dünya'ya ilişkin bilgimiz artmış, bin yıllık dönem içinde sabit bir kavrayışa evrilmiş olmakla beraber, bu gelişimin büyük bir bölümü Dünya üzerinde yapılan çalışmanın değişimin çalışması olduğunu ortaya koymuştur.

Gözlemsel kanıtların pek çoğu Dünya'nın her sene, her çağ farklılaşan doğasına işaret eder. İskandinavya'daki bazı buzul göllerinin dizemsel olarak katmanlandırılmış ya da varvli çökeltileri otuz bin yıldan uzun süre boyunca değişen daha ince ve daha kalın parçaları açığa çıkarır; bunlar yıllık bahar çözölmelerinde daha hızlı gelişen erozyonun sonuçlarıdır. Antarktika ve Grönland'da bulunan donmuş buzul özleri, sekiz yüz bin yıllık mevsimsel buz birikintilerinden daha fazlasını ortaya koyar. Wyoming'ın Green River Şeyli'nden kâğıt inceliğinde tortu katmanlarının çökeltileri de bir milyon yıldan uzun süreli yıllık olayları içerir. Bu tabakalardan her biri, kendileri büyük değişim döngülerinin ipucunu veren çok daha yaşlı kayaların üzerinde durur.

Aşamalı jeolojik süreç ölçüleri, Dünya tarihinin daha da geniş aralıklarına işaret eder. Büyük Hawaii adalarının oluşumu, volkanik aktivitelerin ağır ve düzenli biçimde ilerlemesini, lav örtülerinin milyonlarca yıl boyunca üst üste yığılmasını gerektirmiştir. Apalaşlar ve diğer antik geniş dağ sıraları, büyük heyelanların kesintiye uğrattığı milyonlarca yıllık kademeli bir erozyonun sonucudur. Tektonik plakaların bazen düzensiz olan hareketleri, jeolojik

tarih boyunca kıtaları yerinden oynatmış, dağları yükseltmiş ve okyanusları açmıştır.

Dünya her zaman yerinde duramayan, evrilen bir gezegen olmuştur. Çekirdekten kabuğa sürekli bir değişkenlik içindedir. Bugün dahi hava, okyanuslar ve toprak, muhtemelen gezegenimizin yakın geçmişinde benzeri olmayan bir hızla değişmektedir. Bu rahatsız edici küresel değişiklikleri umursamamamız aptallık olurdu ve pek çoğumuz için bu gerçekten de imkânsız görünür; evimize duyduğumuz ilgi ve sevgi, bizim için Eratosthenes için olduğu kadar doğaldır. Fakat öykülenen şaşırtıcı geçmişi, öngörülemeyen dinamik bugünü ve kendimiz ve onun geleceğindeki yerimiz hakkında bize hâlihazırda söylediklerinden bütünüyle yararlanmadan yeryüzünün mevcut durumuna gönderme yapmamız aynı derecede aptalca olurdu.

Hayatımın büyük bölümü canlı, karmaşık, değişken evimizi anlama çabası içinde geçti. Küçük bir çocukken, kaya ve mineraller toplar, odamı fosil ve kristallerle doldururdum, bunlar rastlantısal biçimde bir araya getirilmiş böcek ve kemiklerle yan yana dururdu. Bütün profesyonel kariyerimde Dünya temel konuyu oluşturdu. Atomların mikroskopla görülemeyecek kadar küçük ölçülerıyla deneyler yaparak başladım, kaya oluşturan minerallerin moleküler yapısı üzerinde çalıştım ve Dünya'nın derinliklerinin basınçlı tencereye benzer etkilerini belgelemek için küçük mineral taneciklerini ezdim.

Zamanla bakış açım jeolojinin daha büyük mekânsal ve zamansal dokusunu içine alacak biçimde genişledi. Yeryüzünün doğal kütüphaneleri, Kuzey Afrika çöllerinden Grönland'ın buz sahalarına, Hawaii sahillerinden Rockies zirvelerine, Avustralya'daki Büyük Set Resifi'nden düzinelerce ulustaki antik fosilleşmiş mercan kayalıklarına kadar, elementlerin, minerallerin, kayaların ve yaşamın paylaştığı milyarlarca yıllık bir öyküyü açığa çıkarır. Araştırma programım minerallerin yaşamın antik jeokimyasal kökenlerindeki olası rollerine kaydıkça, Dünya tarihi boyunca yaşamın

ve minerallerin birlikte evrilmesinin geçmişte hayal edildiğinden de çarpıcı olduğunun iddia edildiği çalışmalardan keyif almaya başladım; kıtanın bütünündeki kireç taşı mağaralarında da açıkça görüldüğü gibi yalnızca belirli kayaların yaşamdan doğuyor olusundan değil, yaşamın kendisinin kayalardan doğmuş olabileceğinden de. Dört milyar yılı aşan Dünya tarihi boyunca, minerallerin ve yaşamın -jeoloji ve biyolojinin- evrimsel öyküleri, yeni yeni anlaşılmaya başlanan çarpıcı biçimlerde iç içe geçmiştir. Bu fikirler, 2008 yılında “Mineral Evrimi”ne ilişkin geleneksel olmayan bir yazıda bir araya gelmiştir; bu, bazılarının muhtemelen iki yüz yıl içinde mineralbiliminde gerçekleşen ilk paradigma değişimi olarak kucakladığı, diğerlerininse bilim dalımızın derin zaman bağlamında inanışa ters biçimde olası bir yeniden çerçevelendirilmesi olarak ihtiyatla değerlendirdiği, tartışmalı yeni bir argümandı.

Antik mineraloji disiplini, Dünya ve onun öykülenen geçmişine ilişkin bildiğimiz her şeyin bütünüyle merkezinde olsa da, merak uyandıran biçimde statik ve zamanın kavramsal aşırılıklarından kopuk olmuştur. Kimyasal kompozisyon, yoğunluk ve sertlik ölçüleri, optik özellikler ve kristal yapı, iki yüz yıldan uzun bir süredir mineraloğun temel uğraşlarıdır. Herhangi bir doğal tarih müzesini ziyaret ettiğinizde ne demek istediğimi anlarsınız: Birbiri ardına cam yüzlü ve düz kutular olarak dizilmiş, isim, kimyasal formül, kristal sistem ve mekân gösteren etiketleri olan muhteşem kristal türler. Yeryüzünün bu en değerli parçaları, tarihsel bağlamda zengindir fakat ortaya çıkış dönemlerine ya da sonraki jeolojik dönüşümlerine dair herhangi bir ipucu arayışınız muhtemelen sonuçsuz kalacaktır. Eski yaklaşım, mineralleri etkileyici yaşam öykülerinden neredeyse koparır.

Bu geleneksel bakış açısının değişmesi gerekir. Yeryüzünün zengin kaya birikimini inceledikçe, hem canlı hem cansız doğal Dünya'nın kendisini nasıl tekrar tekrar dönüştürdüğünü daha fazla gözlemleriz. Zamanın ve değişimin ikiz gezegensel gerçekliklerine ilişkin artan kavrayışımız yalnızca minerallerin ilk olarak *nasıl* oluştuğu hakkında değil, *ne zaman* oluştuğu hakkında da varsayımlarda bulunmamızı mümkün kılmıştır. Uzun süredir

zor yaşamsal koşullarının olduğu kabul edilen (aşırı ısınmış volkanik yanardağ ağızlarının, asidik havuzların, arktik buzların ve dev toz bulutlarının olduğu) yerlerdeki organizmaların yakın zamandaki keşifleri de, mineralojinin yaşamın kökenlerini ve sürekliliğini kavrama arayışında temel bir disiplin olduğunu ortaya koymuştur. Alanın en iyi dergisi *American Mineralogist*'in 2008 yılı Kasım sayısında, meslektaşlarımla birlikte mineral krallığı ve bu krallığın zamanın keşfedilmemiş boyutlarındaki inanılmaz dönüşümleri hakkında düşünmenin yeni bir yolunu önerdik. Bundan milyarlarca yıl önce, evrenin herhangi bir yerinde hiçbir mineral olmadığını vurguladık. Büyük Patlama'yı izleyen kızgın girdapta herhangi bir kristal bileşimin varlığını sürdürmesi bir yana, oluşumu dahi mümkün değildi. Yaratım kazanından ilk atomların (hidrojen, helyum ve biraz lityum) bile doğması yarım milyon yıl aldı. Yerçekimi bu ilkel gazlı elementleri ilk nebulalara geçirirken ve sonrasında nebulaları ilk sıcak, yoğun, parlak yıldızlara çökertirken milyonlarca yıl daha geçmiştir. Ancak bu ilk yıldızlar ihtişamlı bir süpernovaya dönüştüğünde, genişleyen, soğuyan element-yoğun gaz tabakaları ilk küçük elmas kristallerini yoğunlaştırdığında, kozmik mineralojik efsane başlayabilmiştir.

Böylelikle kayaların tanıklığının, doğum ve ölüme, durgunluk ve akışa, kökenlere ve evrime dair anlattıkları, bazen parçalı ve muğlak olsa da inandırıcı öykülerin zorunlu bir okuru oldum. Yeryüzünün canlı ve cansız bölgelerinin (yaşamın ve kayaların birlikte geçirdiği evrimin) bu anlatılmamış büyük ve bütünlüklü öyküsü, oldukça büyüleyici. Bu öykü paylaşılmalı, çünkü *biz* yeryüzüyüz. Bize koruma ve besin sağlayan her şey, sahip olduğumuz tüm objeler, gerçekten de etle kaplı kabuklarımızın her bir atomu ve molekülü, yeryüzünden geliyor ve yeryüzüne dönecek. O hâlde evimizi tanımak, kısmen kendimizi tanımaktır.

Yeryüzünün öyküsü de paylaşılmalı çünkü okyanuslarımız ve atmosferimiz uzun tarihlerinde nadiren görülen bir hızla değişiyor. Okyanuslar daha ılık ve daha asitli hâle gelirken yükseliyor. Atmosfer daha çalkantılı hâle gelirken küresel yağış şablonları değişiyor. Kutup buzları eriyor, tundra çözülüyor ve yaşam alanları

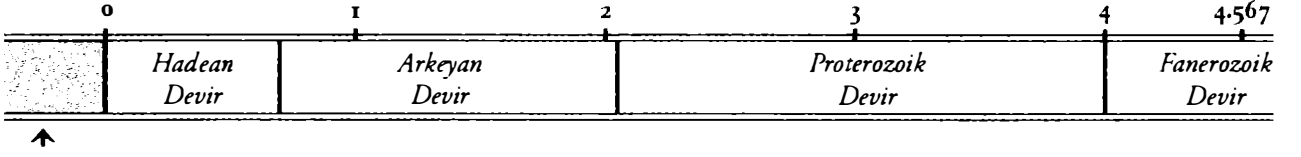
değişiyor. İlerleyen sayfalarda keşfedeceğimiz gibi yeryüzünün öyküsü bir değişim efsanesi, fakat değişimin bu denli ürkütücü bir hızla gerçekleştiği geçmişteki o nadir görülen durumlarda, hayat korkunç bir bedel ödemiş gibi görünüyor. Kendi iyiliğimiz için düşünceli biçimde ve zamanında hareket edeceksek, yeryüzüyle ve onun öyküsüyle yakınlık kurmalıyız. Çünkü 385.000 kilometre ötede yaşamın olmadığı bir dünyadan çekilen o kusursuz resimde son derece açık biçimde görüldüğü üzere başka bir evimiz yok.

Eratosthenes'in ve onu izleyen binlerce meraklı zihnin geleneğinde, benim bu kitaptaki amacım, yeryüzünün uzun değişim tarihini aktarmak. Dünya yakın ve tanıdık görünebilse de canlı öyküsü neredeyse hayallerin ötesinde bir dizi dönüşümsel olayı kucaklıyor. Eviniz olan gezegeni gerçek anlamda tanımak ve onu biçimlendiren sonsuzlukları kavrayabilmek için öncelikle zihninizi yedi temel gerçeğe kuşatmalısınız.

1. Dünya geri dönüştürülmüş ve geri dönüşebilen atomlardan yapılmıştır.
2. Dünya, insan zaman çerçeveleriyle kıyaslandığında, oldukça yaşlıdır.
3. Dünya üç boyutludur ve eylemlerin çoğu göz önünde değildir.
4. Kayalar Dünya tarihinin arşiv görevlileridir.
5. Dünya sistemleri -kayalar, okyanuslar, atmosfer ve yaşam-karmaşık biçimde iç içe geçmiştir.
6. Dünya tarihi bazen ani, geri dönüşü olmayan olaylarla ke-sintiye uğrayan uzun durağanlık dönemlerini kapsar.
7. Yaşam Dünya'nın yüzeyini değiştirmiş ve değiştirmeyi sürdürmektedir.

Dünya'nın varlığına ilişkin bu kavramlar geniş mekân ve zaman destanlarında, atomların, minerallerin, kayaların ve yaşamın iç içe geçmiş öykülerini çerçevelendirir; bu kavramlar ilerleyen

sayfalarda, evrenin ateşten özünün ve yeryüzünün uzayan evriminin her aşamasında yeniden ortaya çıkacaktır. Yeryüzünün ve yaşamın bir arada evrilmesi, bu kitabın temelini oluşturan yeni paradigma, geçmişe, Büyük Patlama'ya kadar uzanan geri dönüşsüz evrimsel aşamalar dizisinin bir parçasıdır. Her aşama bugün yaşadığımız eşsiz dünyaya açılan yolu önüne geçilemez biçimde şekillendirmiş, nihayetinde gezegenimizin yüzeyini tekrar tekrar biçimlendirecek yeni gezegen süreç ve olguları sunmuştur. Bu, Dünya'nın öyküsüdür.



Birinci Bölüm

Doğuş

Dünya'nın Oluşumu

Dünya'nın oluşumundan önceki milyarlarca yılın ölçümü

Başlangıçta Dünya ya da onu ısıtacak herhangi bir Güneş yoktu. Ortadaki parıldayan yıldız, çeşitli gezegen ve aylarıyla Güneş Sistemi'mizin evrendeki varlığı görece yenidir -yalnızca 4,567 milyar yıl. Dünyamız boşluktan doğmadan önce pek çok şeyin olması gerekmiştir.

Dünyamızın doğumu için gerekli ortam bundan çok çok uzun zaman önce, her şeyin kökenini oluşturan Büyük Patlama ile birlikte, son tahminlere göre yaklaşık 13,7 milyar yıl kadar önce oluşturulmuştur. Bu yaratım anı evrenin tarihinde kavranması en güç, anlaşılmaz, tanımlayıcı olay olmayı sürdürür. Bu görülmemiş bir durum –modern bilimin ya da matematiğin mantığının kapsamı dışında kalan, yokluktan varlığa olan bir dönüşümdü. Evrende yaratıcı bir Tanrı'nın işaretlerini arayacak olursanız, başlangıç noktası olması gereken yer Büyük Patlama'dır.

Başlangıçta, tüm uzay, enerji ve madde bilinemez bir boşluktan çıkarak varlık kazanmıştır. Hiçbir şey. Sonra bir şey. Kavram metaforlar oluşturma becerimizin ötesindedir. Evrenimiz geçmişte yalnızca boşluğun olduğu bir yerdé, birdenbire ortaya çıkmamıştır çünkü Büyük Patlama'dan önce hacim ve zaman yoktur.

Hiçlik kavramımız boşluğu imler- Büyük Patlama'dan önce boşluğun içinde olacağı hiçbir şey yoktu.

Sonra bir anda, tek bir şey değil, olabilecek her şey bir arada oldu. Evrenimiz bir atom çekirdeğinden daha küçük bir hacme sahipti. Aşırı sıkıştırılmış evren, kusursuz bütünlüğüne zarar verecek hiçbir parçacık olmaksızın, saf enerji olarak var olmaya başladı. Evren hızla genişledi, ancak uzaya ya da onun dışındaki herhangi bir şeye doğru değil (evrenimizin dışı diye bir yer yoktur). Hacmin kendisi, yine sıcak enerji formunda ortaya çıktı ve büyüdü. Varlık genişledikçe hacim soğudu. Atom içinde oluşan ilk parçacıklar Büyük Patlama'nın bir saniyeden az bir süre sonrasında ortaya çıktı -elektronlar ve temel parçacıklar, Dünya'mızın tüm katı, sıvı ve gazlarının görülmeyen özü saf enerjiden oluştu. Bundan kısa bir süre sonra, yine ilk kozmik saniyenin ilk bölümü dâhilinde, temel tanecikler, her atom çekirdeğinde bulunan proton ve nötronların da dâhil olduğu daha büyük parçacıklar oluşturmak üzere ikili ve üçlü gruplar hâlinde bir araya geldi. Her şey hâlâ olağanüstü derecede sıcaktı ve yaklaşık yarım milyon yıl boyunca, süregelen genişleme sonunda evreni birkaç bin derecelik bir sıcaklığa (elektronların çekirdeklerle birleşip ilk atomları oluşturması için yeterli soğukluğa) ulaştırana dek bu şekilde kaldı. Bu ilk atomların büyük çoğunluğu (tüm atomların yüzde doksandan fazlası) hidrojeni ve buna dâhil edilen çok küçük bir helyum yüzdesi ve lityum parçası vardı. Bu elementlerin karışımı ilk yıldızları oluşturdu.

İlk Işık

Yerçekimi kozmik kümeleşmenin büyük lokomotifidir. Bir hidrojen atomu küçük bir şeydir fakat onu alıp altmışıncı güce kadar onla çarptığınızda (bu bir trilyon-trilyon-trilyon-trilyon-trilyon hidrojen atomu demektir) birbirleri üzerinde oldukça etkileyici, kolektif bir yerçekimsel güç uygularlar. Yerçekimi onları içeriye, ortak bir merkeze çeker ve özün epik baskılarıyla bir yıldız -dev bir gaz topu- oluşturur. Büyük bir hidrojen bulutu çökerken, yıldız oluşturma süreci, hareket eden atomların kinetik enerjisini kümelenmiş

hâllerinin potansiyel enerjisine dönüştürür; bu da bir kez daha sıcaklığa dönüşür; bu bir asteroid Dünya'ya çarptığında oluşan şiddetli sürecin aynısıdır fakat çok daha fazla enerji salınımıyla gerçekleşir. Hidrojen katmanının özü, sonunda milyonlarca derecelik ısıya ve milyonlarca atmosfer basıncına erişir.

Bu türden ısı ve basınçlar nükleer füzyon tepkimeleri denilen yeni bir olguyu tetikler. Bu sıra dışı koşullar altında, (her biri tek bir protona sahip olan) iki hidrojen atomunun çekirdekleri öyle bir güçle çarpışır ki nötronlar bir çekirdekten diğerine aktarılır ve bazı hidrojen atomlarını diğerlerinden daha büyük hâle getirir. Bu türden pek çok çarpışmadan sonra, iki protonlu bir helyum çekirdeği oluşur. Şaşırtıcı biçimde, ortaya çıkan helyum atomu, kendisini oluşturan özgün hidrojen atomlarından yaklaşık yüzde bir daha az büyüktür. Bu kayıp kitle (tıpkı bir hidrojen bombasında yaptığı gibi) doğrudan ısı enerjisine dönüşür ve bu da daha fazla nükleer füzyon tepkimesini destekler. Yıldız, çevresindekileri ısıyan bir enerjiyle yıkayarak “ateşler”, öte yandan hidrojeni azalırken helyum yoğunluğu gittikçe artar.

Pek çoğu Güneş'imizden çok daha büyük olan büyük yıldızlar, sonunda özlerindeki olağanüstü hidrojen birikimini tüketmiştir. Fakat içsel basıncın ve sıcaklığın yoğunluğu nükleer füzyonu tetiklemeyi sürdürmüştür. Yeni nükleer enerji titreşimleri, özü çevreleyen atomların küresel bir katmanında hidrojen füzyonunu tetiklerken dahi, bir yıldızın özündeki iki protonlu helyum atomları karbonu, altı protonuyla yaşamın çok önemli bir unsurunu oluşturmak üzere bir araya gelmiştir. Daha sonra göbek karbonu neonu ortaya çıkaracak biçimde, neon ise oksijeni, magnezyumu, silikonu, sülfürü, vb. oluşturacak biçimde birleşmiştir. Yıldız, füzyon tepkilerinin birbirini izleyen eş merkezli tabakalarıyla birlikte kademeli olarak soğanımsı bir yapı geliştirmiştir. Bu tepkiler, demir üretim aşamasının bir günden fazla sürmediği nihai evreye kadar gittikçe daha hızlı biçimde görülür. İlk yıldızların yaşam döngülerindeki bu noktada, Büyük Patlama'nın milyonlarca yıl sonrasında, periyodik tablodaki ilk yirmi altı elementin büyük bölümüne, pek çok yıldızın içinde nükleer kaynaşım ile varlık kazandırılmıştır.

Demir, bu nükleer kaynaşım süreci devam edebildiği sürece varlığını sürdürür. Hidrojen helyum üretmek üzere eridiğinde, helyum karbon üretmek üzere eridiğinde ve tüm diğer füzyon adımları atılırken çok fazla nükleer enerji açığa çıkar. Fakat demir, herhangi bir atom çekirdeğinde bulunan en düşük enerjiye sahiptir. Yanan bir ateşin her yakıt parçasını küle dönüştürmesi gibi tüm enerji tüketilmiştir. Demir nihai nükleer küldür; demirin herhangi bir şeyle birleştirilmesi yoluyla hiçbir nükleer enerji çıkarılamaz. Dolayısıyla ilk büyük yıldız kaçınılmaz demir özünü ürettiğinde, oyun bitmiş ve felaketle sonuçlanmıştı. Bu noktaya kadar yıldız sabit bir dengeyi korumuş, iki büyük iç gücünü dengelemişti: Yerçekiminin kütleyi merkeze doğru çekişi ve nükleer reaksiyonların kütleyi merkezden dışarıya doğru itiş. Ancak çekirdek demirle dolduğunda, dışarıya doğru itiş durdu ve hayal edilemeyecek bir şiddet anında yerçekimi egemen oldu. Bütün yıldız öyle büyük bir hızla içeriye doğru çöktü ki kendisinden yansıdı ve ilk süpernovada patladı. Yıldız parçalara ayrılmış, dış yüzey kütlesinin büyük bir bölümü yanmıştı.

Kimyanın Doğuşu

Evrende tasarım arayan okurlar için, süpernovalar yaklaşık olarak Büyük Patlama kadar iyi birer başlangıç noktasıdır. Elbette Büyük Patlama kaçınılmaz olarak hidrojen atomlarının oluşumuna yol açmış ve hidrojen atomları da aynı şekilde karşı konulmaz biçimde ilk yıldızları oluşturmuştur. Ancak yıldızların kendi başlarına sizi canlı modern Dünya'mıza nasıl götürdüğü hiçbir şekilde net değildir. Büyük bir hidrojen topu, demire kadar uzanan, büyüyen bir ağır çekirdeğe bağımlı elementler bütünü olsa da bir şeyleri çok ilginç biçimde ilerletmeye yardımcı olur gibi görünmez.

Fakat ilk büyük yıldızlar patladığında kozmik yenilik ortaya çıktı. Bu parçalanan cisimler uzayı yaratmış oldukları elementlerle tohumladı. Karbon, oksijen, nitrojen, fosfor ve sülfür -yaşamın elementleri- özellikle çok sayıdaydı. Pek çok sıradan kayanın kompozisyonunu belirleyen ve yeryüzüne benzeyen gezegenler

kütlesinin büyük bir bölümünü oluşturan magnezyum, silikon, demir, alüminyum ve kalsiyum da büyük miktardaydı. Fakat patlayan bu yıldızların akıl almaz ölçüde enerjik çevresinde, bu elementler tüm periyodik tabloyu -elementleri- yirmi altı sayısının çok ötesine taşıyacak şekilde yeni ve egzotik biçimlerde birleşmişti. Böylelikle daha nadir görülen pek çok elementin ilk izleri ortaya çıktı: Değerli gümüş ve altın, faydacıl bakır ve çinko, zehirli arsenik ve cıva, radyoaktif uranyum ve plütonyum. Dahası, tüm bu elementler, birbirlerini bulabilecekleri ve kimyasal reaksiyonlar yoluyla yeni ve ilginç biçimlerde bir araya gelebilecekleri uzaya fırlatıldı.

Kimya sıradan bir atom bir diğerine çarptığında gerçekleşir. Her atomun pozitif bir elektrik yükü olan, negatif yüklü elektronların bir ya da daha fazlasının bulut benzeri yayılımıyla çevrelenmiş, küçük fakat yığınsal bir merkez çekirdeği vardır. Yalıtılmış atom çekirdekleri, yıldızların iç bölgelerinin nihai basınçlı tencere çevreleri dışında, neredeyse hiç etkileşime geçmez. Fakat bir atomdan gelen elektronlar sürekli olarak yakındaki atomların elektronlarına çarpar. Kimyasal reaksiyonlar iki ya da daha fazla atom karşılaştığında ve onların elektronları etkileşime geçerek yeniden düzenlendiğinde gerçekleşir. Elektronların bu şekilde bir araya gelmesi ve paylaşımı, elektronların belirli bileşimlerinin, özellikle iki, on ya da on sekiz elektrondan oluşan bileşimlerin mutlak stabilliğinden kaynaklanır.

Büyük Patlama'yı izleyen ilk kimyasal reaksiyonlar molekülleri, sıkıca tek bir birimde toplanmış küçük atom kümelerini üretmiştir. Hidrojen atomlarının helyum oluşturmak üzere yıldızlarda bir araya gelmeye başlamasından önce dahi, her biri kimyasal olarak bir araya getirilmiş iki hidrojen atomuna sahip olan hidrojen molekülleri (H_2) uzay boşluğunda oluşuyordu. Her hidrojen atomu yalnızca bir elektron taşır ki bu iki elektronun büyüğü bir sayı olduğu bir evrende oldukça dengesiz bir durumdur. Dolayısıyla iki hidrojen atomu karşılaştığında, kaynaklarını paylaşılan o iki elektronun büyüğü sayısı bir molekül oluşturmak üzere bir araya getirirler. Büyük Patlama'dan sonraki hidrojen bolluğu göz önünde bulundurulduğunda, hidrojen molekülleri kesinlikle ilk

yıldızlardan önce oluşmuş ve ilk atomların oluşumundan bu yana evrenimizin değişmez bir özelliği olmuştur.

İlk süpernovanın ardından, çeşitli elementler uzayı tohumlar-ken, çok sayıda başka ilginç moleküller de oluşabiliyordu. İki hid-rojen atomunun tek bir oksijen atomuyla birleştiği su (H_2O) ilk örneklerden biriydi. Nitrojen (N_2), amonyak (NH_3), metan (CH_4), karbon monoksit (CO) ve karbondioksit (CO_2) moleküllerinin de süpernovayı çevreleyen uzayı zenginleştirmiş olması ihtimal dâ-hilindedir. Tüm bu moleküler türlerin, gezegenlerin ve yaşamın kökenlerinin oluşumunda temel rolleri olacaktı.

Sonra mineraller (kimyasal bir kusursuzluk ve kristalimsi bir düzen içindeki mikroskobik katı hacimler) oluştu. İlk mineraller ancak mineral oluşturunca elementlerin yoğunluğunun yeterince fazla fakat havanın, atomların kendilerini küçük kristaller hâlinde yeniden düzenleyeceği kadar serin olduğu yerlerde oluşabilirdi. Büyük Patlama'dan yalnızca birkaç milyon yıl sonra, patlayan yıl-dızların genişleyen, soğuyan dış kabukları bu türden reaksiyonlar için kusursuz ortamı oluşturdu. Saf karbon, elmas ve grafit kris-talleri muhtemelen evrendeki ilk kristallerdi. Bu öncü kristaller ince bir toz tabakası gibiydi, tanecikler tek başlarına ayırt edile-meyecek ölçüde küçük fakat muhtemelen uzaya biraz elmas pı-rıltısı ekleyecek kadar genişti. Bu kristalimsi karbon formlarına kısa süre sonra magnezyum, kalsiyum, silikon, nitrojen ve oksije-nin de dâhil olduğu daha bilindik elementlerin aralarında olduğu diğer yüksek ısı katı maddeler dâhil oldu. Bunlardan bazıları, oldukça renkli çeşitleri, yakut ve safirle oldukça değerli olan ko-rindon (alüminyum ve oksijenin kimyasal bileşimi) gibi bilindik minerallerdi. Magnezyum silikat olivinin, Ağustos'un ikinci dere-cede değerli burç taşının küçük miktarları da ortaya çıktı ve bun-lara bugünlerde sıklıkla elmasın ucuz sentetik bir karşılığı olarak satılan bir silisyum karbür olan moissanit de katıldı. Gezegenler arasındaki tozlar bir arada muhtemelen bir düzine ortak "ilkel-mi-neral"e ev sahipliği yaptı. Dolayısıyla, ilk yıldızların patlamasıyla birlikte, evren daha ilginç bir hâl almaya başladı.

Evrenimizde hiçbir şey yalnızca bir kez gerçekleşmez; muhtemelen Büyük Patlama bu durumun tek istisnasıdır. Patlayan eski yıldızların yayılan enkazı sürekli olarak yerçekiminin düzenleyici gücüne maruz kalıyordu. Dolayısıyla eski yıldız nesillerinin kalıntıları, her biri geçmişteki pek çok yıldızın enkazını temsil eden geniş bir yıldızlararası gaz ve toz bulutu olan yeni nebular oluşturarak, yeni yıldız popülasyonlarını şaşmaz biçimde tohumluyordu. Her yeni nebula bir öncekine göre daha fazla demir ve daha az hidrojen barındırıyordu. Bu döngü, 13,7 milyar yıl boyunca, eski yıldızlar yeni yıldızlar ürettikçe ve yavaş yavaş evrenin yapısını değiştirdikçe devam etti. Milyarlarca yıldızın içinde milyarlarca yıldız ortaya çıktı.

Kozmik İpuçları

Bir zamanlar, bundan beş milyar yıl kadar önce, gelecekte, galaksi uydu kentlerindeki gayrimenkullerimiz Samanyolu'nun merkezinin yarı yarıya dışında, yıldız saplanmış bir helezon kolun ıssız ucunda yer alıyordu. Bu gösterişsiz çevrede, karanlık boşlukta ışık yılları boyunca uzanan büyük bir gaz ve buzlu toz nebulası dışında pek az şey bulunabilirdi. Bu bulutun on parçasından biri hidrojen atomu; kalanların onda dokuzu da helyum atomuydu. Küçük organik moleküllerin ve mikroskobik mineral taneciklerinin yoğun biçimde bulunduğu buz ve toz, geri kalan yüzde birlik oranın içeriğini açıklıyordu.

Uzayda yıldız kümesine ait bir bulut, bir tetikleme (örneğin yakınlarda patlayan bir yıldızdan gelen bir şok dalgası) yeni bir yıldız sistemine çöküşünü başlatmadan önce milyonlarca yıl varlığını sürdürebilir. Bundan yaklaşık 4,6 milyar yıl kadar önce, bu türden bir tetikleme Güneş Sistemi'mizin oluşumunu başlattı. Milyonlarca yıl içinde, oldukça yavaş biçimde, türbülanslı presolar¹ gaz ve toz kitlesi içeriye doğru çekildi. Büyük bulut, yerçekimi çelimsiz kollarını merkeze doğru çektikçe, hızla dönen bir buz kayakçısı gibi gittikçe daha hızlı döndü. Çökerek daha hızlı döndükçe,

1 Güneş Sistemi öncesi.

bulut daha da yoğunlaştı ve büyüyen bir merkezi çıkıntısı olan bir disk (yeni doğan Güneş) şeklinde yassılaştı. Merkezdeki o açgözlü hidrojen yoğun top gitgide büyüdü ve sonunda bulutun kütlesinin yüzde 99,9'unu yuttu. O büyüdükçe, içsel basınçlar ve dereceler Güneş'i tutuşturarak erime derecesine yükseldi.

Bundan sonraki aşamada olanların ipuçları Güneş Sistemi'mizin -gezegenlerinin ve aylarının, uydu ve asteroitlerinin ve çok sayıdaki farklı gök taşlarının kayıtlarında korunur. Çarpıcı özelliklerden biri tüm gezegen ve ayların aynı düzlemde ve aynı yönde Güneş'in yörüngesinde dönmesidir. Dahası, Güneş ve gezegenlerin büyük bir bölümü az çok aynı düzlemde ve yönde, kendi akslarında döner. Hareket yasalarında dönüştaki bu ortaklığı gerektirecek hiçbir şey yoktur; gezegenler ve aylar herhangi bir yöne (kuzeyden güneye, doğudan batıya, yukarıdan aşağıya, aşağıdan yukarıya) dönebilir ve yine yerçekimi yasasına uyabilirdi. Gezegenler ve aylar uzaktan, rastlantısal kaynaklardan görüntülenmiş olsaydı bu türden bir karmaşa olması beklenebilirdi. Çelişkili biçimde, Güneş Sistemi'mizde gözlemlenen eş biçimsel yörüngesel yakınlık gezegenlerin ve ayların tümünün, az çok aynı zaman diliminde aynı düz, dönen toz ve gaz levhasından oluştuğunu ortaya koyar. Tüm bu büyük objeler, özgün türbülanslı bulut döneminden itibaren aynı dönme duygusunu (tüm Güneş Sistemi'nin paylaşılan açısal ivmesini) korur.

Güneş Sistemi'nin kökenlerine ilişkin ikinci bir ipucu da sekiz büyük gezegenin özel dağılımında görülür. Güneş'e en yakın olan dört gezegen -Merkür, Venüs, Dünya ve Mars- büyük oranda silikon, oksijen, magnezyum ve demirden oluşan görece küçük, kayalık dünyalardır. Siyah volkanik bazalt taşı gibi iri kayalar yüzeylerini kaplar. Buna karşılık, dışarıdaki dört gezegen (Jüpiter, Satürn, Uranüs ve Neptün) temelde hidrojen ve helyumdan oluşan gaz bulutu gezegenleridir. Bu devasa kürelerin hiçbir katı yüzeyi yoktur, yalnızca daha derine doğru ilerledikçe atmosfer kalınlaşır. Dünyaların bu ikiliği, Güneş Sistemi tarihinin ilk evrelerinde, Güneş'in doğumundan sonraki birkaç bin yıl içinde, güçlü bir Güneş yelinin, kalan hidrojen ve helyumu çok uzaktaki daha soğuk

bölgelere taşıdığını ortaya koyar. Buna karşılık merkezdeki sıcak yıldızın yakın kalan daha iri, mineral açısından zengin toz tane-cikleri, bir araya gelerek kayalık iç gezegenleri oluşturmuştur.

Dünya'yı ve diğer iç gezegenleri oluşturan zorlu süreçlerin ayrıntıları, gök taşlarının büyüleyici çeşitliliklerinde korunmuştur. Evimize gökyüzünden sürekli taşlar serpildiğini düşünmek biraz rahatsız edicidir. Aslında (talihsiz Fransız köylülerinin de içinde olduğu çeşitli masallar dâhil) folklorda renkli gök taşı anekdotlarına getirilen kesinlikle hiçbir kısıt olmamasına karşın, bilimsel topluluk bunlara yaklaşık iki yüz yıl öncesine kadar pek fazla ilgi göstermemiştir. Bilim insanlarının gök taşı düşmelerini daha resmi biçimde betimlemeye başladığı dönemde dahi, kökenlerini açıklamak bir yana, bunları belgeleme yönünde pek az tekrarlanabilir bilimsel kanıt toplanabilmiştir. Amerikan devlet adamı ve doğabilimci Thomas Jefferson, Weston, Connecticut'ta gözlem-lenen bir gök taşı darbesinin, Yale Üniversitesi'nden alınan teknik raporunu okuduktan sonra, durumu şu sözlerle hicveder: "Amerikalı iki profesörün yalan söylediğine inanmak, benim için gök-yüzünden taşların düşeceğine inanmaktan daha kolay."

İki yüzyıl ve on binlerce gök taşının bulunması sonrasında, artık gerçeklikleri sorgulanmıyor. Gök taşı uzmanları daha fazla alana hâkim oldukça ve hevesli koleksiyoncular en nadir bulunan türler için rekabet ettikçe, dünya çapındaki müzelerin ve özel koleksiyonların sayısı arttı. Bu zengin kaynaklar, bir dönem siyah kabukları, tuhaf biçimde yontulmuş şekilleri ve sıra dışı ölçüde yüksek yoğunluklarıyla sıradan kayaların arasından sıyrılan özel demir gök taşları yararına kullanıldı. Fakat 1969 yılında, eski Antarktika buz tarlalarında serili binlerce gök taşının keşfedilmesi, bu algıyı değiştirdi.

Gök taşları gezegenimizin kökenlerinin en bariz ipuçlarıdır. En bilindik ve eski olanlar, 4.566 milyar yaşındaki çakıllı gök taş-ları, Güneş Sistemi'ndeki gezegen ve ayların oluşumunun hemen öncesinde, Güneş'in nükleer reaktörünün ilk kez açıldığı ve yoğun ışıyan enerjinin kuşatıcı nebulayı kavurduğu dönemde görü-lür. Yüksek fırın etkisi tozlu diski, "tanecik" için kullanılan Antik

Yunan kavramından esinlenmeyle kondrul (gök kumu) denilen küçük, yapışkan kaya damlacıkları şeklinde eritmiştir. Boyutları havalı tüfek mermisi boyutundan küçük bezelyelere kadar değişkenlik gösteren, Güneş'in arıtıcı ateşinin bu ürünleri, Güneş'e en yakın bölgeleri dönüştüren tekrarlanan radyasyon titreşimleriyle defalarca eritilmiştir. Daha ince taneli presolar toz ve mineral parçalarıyla bir araya getirilen bu antik kondrullar, yeryüzüne inen milyonlarca primitif kondriti oluşturur. Kondritler bize Güneş'in doğuşundan hemen sonraki fakat gezegenlerin oluşumundan önceki kısa zaman dilimine ait en iyi görüntüyü sunar.

Gök taşlarının toplu hâlde akondritler olarak adlandırılan ikinci, daha genç bir sınıfı, Güneş Sistemi'nin ilk maddelerinin taşındığı -eritildiği, ezildiği ya da dönüştürüldüğü- dönemden itibaren var olmuştur. Akondritik gök taşlarının çeşitliliği çarpıcıdır; parlak metal külçeleri, bazıları cam kadar ince kumlu, diğerlerinde üç santimlik ışıltılı kristaller olan karartılmış kaya kütleleri. Dünyanın en uzak bazı bölgelerinde, hâlâ yeni çeşitlerin önemli keşifleri yapılmaktadır.

Antarktika kıtasında geniş antik mavi buz düzlükleri bulunur; bunlar hiç kar yağmayan yerlerdir. Uzaydan düşen kayalar orada, karanlıkta, geri kazanılmayı bekleyen yersiz objeler olarak durur. Bölgenin ticari istismarını yasaklayan uluslararası antlaşmalar, uzaktaki buz tarlalarına sınırlı erişimle birlikte, Dünya dışında bulunan bu kaynakların bilimsel çalışma için korunmasını güvence altına alır. Helikopterlerindeki ve kar arabalarındaki bilim insanları, toplu hâlde bu ürkütücü buz çöllerini kilometrelerce aşındırır. Her bulguyu dikkatlice kayıt altına alıp paketlerler ve hiçbir elin, hiçbir nefesin bulguların yüzeyini bozmadığından emin olurlar. Bu gök taşı avcıları, her Antarktika yaz döneminin bitiminde medeniyete döndükten sonra, hazinelerini toplu koleksiyonlara, özellikle Suitland, Maryland banliyösündeki, binlerce türün futbol sahaları boyutunda binalar içinde son derece temiz, hava geçirmez depolarda tutulduğu Smithsonian Enstitüsü depolama tesislerine aktarır.

Avustralya'daki, Güneybatı Amerika'daki, Arap Yarımadası'ndaki ve en etkileyicisi, Kuzey Afrika'daki geniş Sahra Çölü gibi büyük çöller, Dünya'nın düzenli iyileşmesine ve verimsiz tedavisine çok az yardımcı olmasına rağmen gök taşları yönünden aynı ölçüde zengindir. Sahra'yı geçen gezginler (Tuaregler, Berberiler, Fizanlılar) arasında gök taşlarının değerli olabileceği söylentisi yayılmıştır. Yirmi birinci yüzyılın başlarında Kuzey Afrika'nın yer değiştiren kumlarında bir yerlerde bulunan tek bir değerli kameri gök taşı, özel bir satışta bir milyon dolar kazandırmakla ünlenmiştir. Bir çöl binicisi için devesinden inip tuhaf bir taşı yakındaki kasabaya, uydu telefonlarıyla çevrelenmiş ve mübalağa yapmakta yetenekli, resmi olmayan bir gök taşı komisyoncuları derneğinden birinin ona nakit ödeme yapmayı önereceği bir yere taşınması yeterince kolaydır. Kayalarla dolu çantalar bir satıcıdan diğerine, her seferinde bir fiyat artışıyla aktarılır, ta ki Marakeş'e, Rabat'a ya da Kahire'ye ulaşana ve bu noktadan eBay ve büyük uluslararası taş ve mineral gösterilerindeki alıcılara ulaşana dek.

Fas'ın uzak bölgelerine yaptığım jeoloji gezilerinde birden fazla kez, bana gök taşı görünümünde beş on kilo kayayla dolu çuval bezinden çantalar sunuldu; "komisyoncu yok, çölden yeni geldi, henüz geçen hafta bulundu." Yalnızca nakit paranın geçtiği bu "antlaşmalar," sıklıkla sunulan şeyin ne olduğunu görmenin neredeyse imkânsız olduğu cayır cayır yanan Güneş'ten uzakta, kerpiç evlerin penceresiz arka odalarında pazarlanır. Selamlaşma formaliteleri ve geleneksel nane çayı fincanları paylaşıldığında, satıcı içerikleri bir halıya yığar. Kayalardan bazıları sadece kayadır. Çakıl. Bu işten anlayıp anlamadığınızı ölçmek için yapılan bir test gibidir. İçlerinden pek azı bir zeytin ya da yumurta boyutunda, en sık görülen türdeki kondrit olacaktır; bazılarının, gökyüzünden hızla düşmenin sonucunda, ateşin etkisiyle oldukça erimiş bir füzyon kabuğu olacaktır. Başlangıç ücreti her zaman oldukça yüksektir. Fazla sıradan olduklarını söyleyecek olursanız, belki demir bir gök taşı ya da daha egzotik bir unsuru olan daha küçük, ikinci bir çanta ortaya çıkabilir.

Skoura'nın birkaç kilometre doğusunda, tozlu bir yan yolda, rehberimiz Abdullah'ın yaptığı bir anlaşmayı hatırlıyorum. Tutarlığı kuşkulu, uzaktan bir tanıdık olan satıcı, uydu üzerinden aramış ve gizlilik talep etmişti. "Marşlı olabilir," dedi Abdullah'a. Dokuz yüz gram. Yalnızca yirmi bin dirhem." Yaklaşık 2400 dolardı -şayet bu gerçekse, Mars'tan gelen yaklaşık iki düzine gök taşına eklenmesi mümkün olursa bu bir pazarlık olacaktı. Zamanı ve yeri ayarladılar. Nereden geldiği bilinmeyen iki araba yan yana park etti; üçümüz dışarı çıktık ve birbirimizden ayrılmadan durduk. Söz konusu taş kadife bir keseden yavaşça çıkarıldı. Fakat (tüm Mars gök taşları gibi) sıradan bir taş benzliyordu. Fiyat on beş bin dirheme düştü. Sonra on iki bin dirheme. Fakat emin olmanın hiçbir yolu yoktu, bu yüzden de vazgeçtik. Daha sonra Abdullah bana etkilendiğini itiraf etti fakat her zaman daha fazla gök taşı vardır. Tek bir şey konusunda fazla hırslı olmamak en iyisidir; hiç kimse doğruyu söylemez ve tüm anlaşmalar son anlaşmadır.

Antarktika'da olduğu gibi, ekvatorial çöller her türden gök taşının doğal dağılımını ortaya koyar ve ilk Güneş Sistemi'nin yapısına, dolayısıyla gezegenimizin kökenlerine ilişkin eşsiz ipuçları sunar. Ne yazık ki Antarktika'da bulunan gök taşlarından farklı olarak, bu örneklerin büyük bir bölümü, en az iki nedenden ötürü hiçbir zaman müze koleksiyonlarına giremeyecek. Birinci ve öncelikli olarak (birkaç zengin meraklı ve kolaylıkla erişilebilen Sahra bulgularıyla beslenen) büyüyen amatör koleksiyoncular topluluğu oldukça rekabetçi. Nadir olan her şey hızla ve oldukça büyük meblağlar karşılığında satılıyor. Bu örneklerden bazıları, kesinlikle sonunda müzelere bağışlanacaktır fakat büyük bölümüne gösterilen ilgi yetersizdir ve kısa süre sonra, korunmayan ellerden bulaşan kirle, çok amaçlı bez çantalarla ve her yere yayılmış olan deve gübresiyle el değmemiş bir bulgunun bilimsel değerinin büyük bir kısmı kaybolur. Gök taşlarının ne zaman ve çölün neresinde bulunduğuna ilişkin herhangi bir işlevsel belgelendirmenin olmayışı da aynı ölçüde tedirgin edicidir. Satıcıların tek söyleyeceği "Fas"tır, ki bu da sıklıkla yanlış, çünkü kumlu Sahra'nın büyük bölümü doğuya, Cezayir ve Libya'ya uzanır -bunlar bugün örnek

ithal etmenin yasadışı olduğu ülkelerdir. Dolayısıyla incelikli bir belgelendirme olmaksızın müzelerin büyük bir bölümü Fas ya da Kuzey Afrika'ya ait gök taşlarını kabul etmeyecektir.

Sahra'nın o düşmanca, kurak bölgelerinde ya da Antarktika'nın buz tarlalarında, her kaya gökyüzünden düşen yabancı bir obje olarak öne çıkar. Gök taşı popölasyonunun bu türden saf bir örnekleme bilim insanlarına, Güneş Sistemi'nin yeryüzünün oluştuğu ilk aşamalarına dair en iyi bakış açılarını sunar. Kondritler her on bulgudan yaklaşık dokuzunu temsil eder; geri kalanlar genç Güneş Sistemi'mizin kondritlerin gitgide daha geniş biçimde, önce yumruğunuzun, sonra arabanızın, daha sonra küçük bir şehrin boyutunda kümelenildiği çalkantılı bir nebula olduğu birkaç milyon yıllık döneme ait olan çeşitli akondritlerdir; genç Güneş'in çevresindeki aynı sınırlı dairede tümü yer bulmak için yarışan, birkaç kilometre çapında milyarlarca obje.

Gitgide daha fazla büyüdüler: Önce Rhode Island, sonra Ohio, Teksas ve Alaska kadar. Bu türden binlerce gezegenimsi yapı bu kaotik büyüme sürecinden geçerken, onlar yeni biçimlerde çeşitlendiler. Çapları yaklaşık seksen kilometre kadar büyüdüğünde, iki eşit ısı kaynağı birleşti. Çarpışan pek çok objenin potansiyel yer çekimi enerjisinin yoğunluğu, hafniyum ve plütonyum gibi hızla azalan radyoaktif elementlerin nükleer enerjisinin yoğunluğuna eş değerd. Dolayısıyla, bu gezegenimsi yapıların iç kısımları birbirinden ayrı mineral bölgeleri yumurtaya benzer bir yapıya, [(yumurtanın sarısına eş değ. er) magnezyum silikat kabuk (yumurta beyazı) ve ince kırılğan kabuk] metal açısından zengin yoğun bir öze dönüşerek hemen erirken, bu yapıları oluşturan mineraller ısıyla dönüşüme uğruyordu. En geniş gezegenimsi yapılar içsel ısınmayla, suyun tepkimeleriyle ve sıkışık Güneş banliyölerinde sıkça görülen çarpışmaların yoğun şokuyla değişiyordu. Bu türden dinamik bir gezegen oluşum sürecinin sonucunda muhtemelen üç yüz farklı mineral türü ortaya çıkmıştır. Bu üç yüz mineral her kayalıklı gezegenin oluşumunda yer alması gereken ham maddelerdir ve tümü hâlâ yeryüzüne düşen çeşitli gök taşlarının değişken yapılarında bulunmaktadır.

Zaman zaman, iki büyük gezegenimsi yeterli güçle çarpıştığında, küçük parçalara ayrılarak yok oluyordu. (Dev Jüpiter gezegeninden gelen yerçekimsel aksamalardan dolayı, bu süreç Mars'ın ötesindeki Asteroit Kuşağı'nda bugüne dek devam etmiştir.) Sonuç olarak, bugün bulduğumuz çeşitli akondrit gök taşlarının çoğu, imha olmuş mini gezegenlerin farklı bölümlerini temsil eder. Dolayısıyla akondritleri analiz etmek biraz, patlamış bir kadvradan karmaşık bir anatomi dersi almaya benzer. Özgün bedeninin net bir resmini elde etmek zaman, sabır ve pek çok parçanın bir araya getirilmesini gerektirir.

Gezegenimsi yapıların farklı bir demir gök taşları sınıfı gibi çevrelenen yoğun metalik özleri, yorumlanması en kolay olanlardır. Bir zamanlar en sıradan gök taşı türleri oldukları düşünülmesine karşın, tarafsız Antarktika örnekleme demirlerin tüm düşüşlerin yalnızca yüzde beşini temsil ettiğini ortaya koyar. Gezegenimsi yapıların özleri uygun biçimde küçük olmalıdır.

Gezegenimsi yapıların farklılaşan silikat yönünden zengin örtüleri, pek çok egzotik gök taşı türüyle temsil edilir: Howarditler, eucritler, diogenitler, ureilitler, acapulcoitler, lodranitler ve daha fazlası, bunların her birinin özel bir kompozisyonu, yapısı ve mineralojisi vardır ve pek çoğu bilinen ilk örneğin bulunduğu yerin ismini almıştır. Bu gök taşlarından bazıları, bugün yeryüzünde bulunan kaya türlerine oldukça benzerdir. Eucritler son derece tipik bir tür bazalt taşı temsil eder; bu, Atlantik Ortası Sırtı'ndan çıkan ve okyanus zeminini kaplayan bir kaya türüdür. Temelde magnezyum silikat minerallerinden oluşan diogenitler, geniş bir yer altı magma rezervuarında kristal yerleşimin sonucu gibi görünür. Magma soğudukça, çevrelerindeki sıcak sıvıdan daha yoğun olan kristaller büyümüş ve sonrasında, tıpkı bugün yeryüzünün çok derinlerindeki magma haznelerinde olduğu gibi dibe çökerek konsantre bir kütle oluşturmuşlardır.

Zaman zaman, özellikle yıkıcı bir çarpışma sırasında, bir gök taşı, gezegenimsi yapının silikat mineral yığınlarının ve demir yönünden zengin minerallerin bir arada olduğu çekirdek örtü sınırının bir parçasını koparmıştır. Sonuç güzel bir pallasit, parlıtlı

metalin ve altın olivin kristallerinin çarpıcı bir karışımıdır. Işığın metalden yansıdığı ve olivinin içinden boyalı bir cam gibi geçtiği cilalı pallasit levhaları, gök taşı toplama dünyasında en çok ödüllendirilen türler arasındadır.

Yer çekimi ilk kondritleri bir araya getirdikçe (ve ezici basınç, kaynama noktasındaki ısı, aşındırıcı su ve şiddetli etkiler büyüyen gezegenimsi yapıları yeniden biçimlendirdikçe) gittikçe daha fazla mineral ortaya çıktı. Tüm gök taşı çeşitleri içinde, bütününde iki yüz elliden fazla farklı mineral bulundu; bir düzine presolar ilkel mineralde yirmi katlık bir artış. İlk ince taneli killeri, yaprağa benzer mikaları ve ikinci derecede değerli zirkon taşı içeren bu çeşitli katı maddeler, yeryüzünün ve diğer gezegenlerin yapı taşlarına dönüştü. Gezegenimsi yapılar gitgide daha fazla büyüdü ve en büyük olanı daha küçük olanları yuttu. Nihayetinde her biri küçük bir gezegen boyutundaki birkaç düzine büyük kaya topu, dev elektrik süpürgeleri gibi işlev gördü ve birleşerek dairesel yakın yörüngelere oturdukça Güneş Sistemi'ni toz ve gazının büyük bölümünden arındırdı. Bir objenin son olarak hangi noktada durduğu büyük oranda kütleline bağlıydı.

Güneş Sistemi'ni Birleştirmek

Güneş Sistemi kütlelerinden aslan payını alan Güneş her şeye hâkimdir. Yıldız sistemimizin özel bir büyüklüğü yoktur, dolayısıyla Güneş gösterişsiz türden bir yıldızdır; bu, yakınlarında yaşam olan bir gezegen için iyi bir şeydir. Çelişkili biçimde, bir yıldız ne kadar büyük olursa yaşam süresi de o kadar kısa olur. Büyük yıldızların daha yüksek olan iç ısı ve basınçları, nükleer füzyon reaksiyonlarını gittikçe daha hızlı biçimde iter. Dolayısıyla Güneş'imizin on katı kadar bir kütleyle sahip bir yıldızın ömrü, on katından daha az, en fazla birkaç milyon yıl olabilir; bu, yıldız ölümcül bir süpernovada patlamadan önce uydu bir gezegende yaşamın başlamasına güçlüklerle yetecek bir zaman dilimidir. Öte yandan, bu türden zayıf bir yıldızın enerji üretimi, ısıtılı sarı bağışçımız kadar yaşamsal olmayabilirse de Güneş'in kütlelerinin onda biri kadar bir kütleyle

sahip olan kırmızı bir cüce yıldızın yaşam süresi Güneş'ten on kat (yüz milyar yıl ya da daha fazla) fazla olacaktır.

Orta büyüklükteki Güneş'imiz bir orta yol bulmuştur: Ne fazla büyük ve kısa ömürlü ne de fazla küçük ve soğuktur. Hedeflenen dokuz ya da on milyar yıllık güvenilir hidrojen yakımı, yaşamın sürdürülmesi için çok fazla zamanın olmuş olduğu ve gelişmeyi sürdürmesi için çok daha fazla zaman olduğu anlamına gelir. Doğru, dört ya da beş milyar yıl daha geçtiğinde, Güneş özündeki hidrojeni yitirecek ve helyum yakımına dönmesi gerekecektir. Bu süreçte, mevcut çapının yüz katından daha büyük, çok daha az iyicil dev bir kırmızı yıldız dönüşerek zavallı küçük Merkür'ü girdabına çekecek, Venüs'ü önce haşlayıp sonra yutacak ve yeryüzünde de oldukça tatsız şeylere yol açacaktır. Ancak 4,5 milyar yıldan sonra dahi Güneş'in tuhaf biçimde yaşlanmasından ve yeryüzündeki yaşamın sorunlu hâle gelmesinden önce hâlâ oldukça fazla zamanımız var.

Güneş Sistemi'mizin canlı bir gezegen için bir başka önemli faydası daha vardır. Başka pek çok sistemden farklı olarak bizimki tek bir yıldız sistemidir. Güçlü teleskoplar kullanan astronomlar gece gökyüzünde gördüğümüz her üç yıldızdan yaklaşık ikisinin aslen ikizler (iki yıldızın ortak yerçekimsel bir merkeze ilişkin bir dansta birbirinin uydusu olduğu sistemler) olduğunu açığa çıkarmıştır. Bu yıldızlar oluşurken, hidrojen iki ayrı yerde büyük gaz topları oluşturacak biçimde birikmiştir.

Nebulamız, daha fazla açısal harekete, dolayısıyla Jüpiter bölgesinde daha fazla kütleyle biraz daha girdaplı olmuş olsaydı, Güneş Sistemi'miz muhtemelen aynı zamanda bir çift yıldız sistemi olurdu. Güneş daha küçük olurdu ve Jüpiter büyük, hidrojen yoğun bir gezegen olmak yerine, büyüyerek küçük bir hidrojen yönünden zengin yıldız dönüşürdü. Belki de yaşam bu türden bir kutuplaşma içinde gelişirdi. Belki de başka bir yıldız, ek bir yaşam sürdürme enerjisi sağlardı. Fakat iki yıldızın yerçekimsel dinamikleri aldatıcı olabilir ve yeryüzü, iki güçlü yerçekimsel cazibe merkezi onu iki kutba çektişirdikçe tuhaf bir yörüngesi, istikrarsız bir dönüşü ve tuhaf iklimsel salınımları olan bir dünyaya dönüşebilirdi.

Mevcut durumda, dev gaz gezegenleri, mütevazı boyutları ve Güneş çevresindeki dairesele yakın yörüngeleriyle oldukça iyi huyludur. İçlerinden en büyüğü olan Jüpiter'in kütlesi, Güneş'in kütlesinin binde birinin biraz altındadır. Bu, gezegen komşularını kontrol altına almasına yetecek kadar büyük bir boyuttur; Jüpiter'in yıkıcı yerçekimsel alanı sayesinde, Asteroit Kuşağı'nı oluşturan gezegenimsi yapılar hiçbir zaman tek bir gezegen oluşturacak biçimde birleşememiştir. Fakat Jüpiter kendi özünde nükleer füzyon reaksiyonlarını tetiklemeye yaklaşacak kadar bile geniş değildir; yıldızlar ve gezegenler arasındaki tanımlayıcı farklılık budur. Daha uzaktaki halkalı gezegen Satürn ve daha uzakta bulunan soğuk Uranüs ve Neptün daha da küçüktür.

Ancak tüm bu gaz bulutu gezegenleri, Güneş Sistemi içindeki küçük Güneş sistemleri gibi yerçekimsel olarak bağlı kendi enkaz disklerini kapsayacak kadar genişti. Sonuç olarak, dıştaki dört gezegenin de büyüleyici uydu takımları vardır, devlerin yerçekimine kapılan ve sonra yörüngeye giren görece küçük bazı asteroitler dâhil. Bazıları yaklaşık olarak dört iç gezegen kadar geniş olan ve kendilerine ait dinamik jeolojik süreçleri olan diğer uydular, kalan toz ve gazlardan (gezegen yapılandırmasının kalıntılarından) olması gerekene yakın bir yerde oluşmuşlardır. Aslında, Güneş Sistemi'ndeki en aktif obje Jüpiter'in uydusu Io'dur; Io büyük gezegene öyle yakındır ki kırk bir saatte bir bütün bir yörüngeyi tamamlar. Epik gelgitler sürekli olarak uydunun 3.650 kilometrelik çapını vurgular ve yarın düzine volkanı, Güneş Sistemi'nde başka hiçbir şeye benzemeyen biçimde yüzeyin yüz altmış kilometreden fazla üzerine çıkan sülfür gayzerleriyle güçlendirirler. Avrupa ve Ganymede, kabaca Merkür boyutunda olan ve yaklaşık olarak eşit su ve kaya oranlarına sahip olan büyük uydular da aynı ölçüde şaşırtıcıdır. Her iki uydunun da içi Jüpiter'in aralıksız gelgitleriyle sıcak tutulur. Sonuç olarak, her ikisinin de derin, kuşatıcı, buzlarla kaplı okyanusları vardır; bunlar NASA'nın farklı dünyalarda süregelen yaşam arayışında hedeflediği yerlerdir.

Güneş'ten bir kademe daha uzakta bulunan Satürn gezegeni, yaklaşık iki düzine uyduya sahiptir, yanı sıra parlıtlı bir yansıtıcılığı

olan küçük su buzlu parçalarının hâkim olduğu muhteşem bir çember sistemi vardır. Satürn'ün uydularının büyük bir bölümü görece küçüktür, bazıları yörüngeye yakalanan asteroitlerdir, diğerleri ise Satürn'ün gazlı kalıntılarından oluşmuştur; fakat en büyük uydu Titan, Merkür'den daha büyüktür ve kalın, turuncu bir atmosfere gizlenmiştir. 14 Ocak 2005'te yere inen Avrupa Uzay Ajansı'nın Huygens uzay aracı sayesinde, Titan'ın dinamik yüzeyinin yakından çekilmiş görüntüleri elimizdedir. Kollara ayrılan bir nehirler ve akıntılar ağı, soğuk sıvı hidrokarbon göllerini beslemektedir; yoğun, renkli ve çalkantılı atmosfer organik moleküllerle örülüdür. Titan yaşam belirtileri bulma umuduyla keşfetmeye degecek bir diğer dünyadır.

Gaz bulutundan oluşan en uzaktaki gezegenler Uranüs ve Neptün'ün de, aynı şekilde ilginç uydulara sahip olduğu söylenebilir. Bu uydulardan pek çoğu su buzlu, organik moleküller ve süregelen dinamik aktivite göstergelerine sahiptir. Neptün'ün büyük uydusu Triton'da nitrojen açısından yoğun bir atmosfer bile bulunur. Hem Uranüs hem de Neptün, Satürn'ün buzlu çemberlerini oluşturan ısıtılı parçalardan oldukça farklı, gözle görülür biçimde otomobil boyutunda karbon yönünden zengin materyal yığınlarından oluşmalarına karşın, kendi karmaşık çember sistemlerine sahiptir.

Kayalık Dünyalar

Eve yaklaştıkça yer çekimi de kendini hissettirmeye başladı. Güneş'in ateşlenmesinden sonra, hidrojen ve helyumun büyük bir bölümünün dışarıya, gaz bulutundan oluşan gezegenlerin bulunduğu bölgeye aktarımıyla birlikte, iç Güneş Sistemi'nin elinde kurcalayabileceği çok daha az şey kaldı ve bunların büyük bir bölümü sert kayalardan, kondrit ve akondrit gök taşlarından oluşuyordu. En küçük ve en kuru kayalık gezegen olan Merkür, Güneş'e en yakın yerde şekillendi. Kavrık, düşman bir dünya olan bu en içteki gezegen ölmüş ve hırpalanmış görünüyor: Milyarlarca yıl içinde kraterlerle dolmuş olan yüzeyi, havasız bir gökyüzünün altında duruyor. Sizden Güneş Sistemi'ndeki, hayatınızla kumar

oynadığınız objeleri isimlendirmeniz istenirse, Merkür listenizin en üstünde olmalıdır.

Bir sonraki gezegen olan Venüs'ün boyutu Dünya'ninkine ay- nıdır fakat büyük oranda, Güneş'e yaklaşık kırk dokuz milyon kilo- metre yakın olan yörüngesinden ötürü, yaşama elverişlilik açısin- dan radikal ölçüde farklıdır. Tarihinin erken dönemlerinde makul oranlarda su haznesine, hatta sığ bir okyanusa sahip olmuş olabi- lir fakat Güneş'in ısısına ve rüzgârına maruz kalan Venüs suyunun büyük bir bölümü buharlaşarak yok olmuştur ve bu da gezegende su bulunmasını engellemiş görünür. Kalın Venüs atmosferindeki baskın gaz olan karbondioksit, Güneş'in ışıyan enerjisini dışarı sız- dırmamış ve kaçak bir sera etkisi yaratmıştır. Bugün Venüs'ün or- talama yüzey ısıları 370 santigrat dereceyi aşar; bu kurşunu erit- meye yetecek bir ısıdır.

Dünya'nın hemen arkasında olan Mars çok daha küçüktür; Dünya'nın onda biri kadar bir kütleye sahiptir fakat pek çok açı- dan Dünya'ya en çok benzeyen gezegendir. Tüm kayalıklı geze- genler gibi Mars'ın da metal bir özü ve silikat bir kabuğu vardır. Dünya gibi onda da bir atmosfer ve çok fazla su vardır. Görece za- yıf yer çekiminin hızlanan gaz moleküllerini atmosferin üzerinde tutması pek kolay olmaz, dolayısıyla hem havada hem de suda milyarlarca yıl bunları aşındırmıştır fakat Mars'ta yine de yaşa- mın belirsiz bir sığınağı koruyabileceği ılık, ıslak yer altı rezervu- arları bulunur. Gezegen misyonlarının büyük bir bölümünün kır- mızı gezegeni hedef aldığına şüphe yoktur.

“Güneş'ten sonra üçüncü kaya” olan yeryüzü, yaşanabilir “Gol- dilocks” bölgesinin ortasında yer alır. Güneş'e yeterince yakındır ve Güneş Sistemi'nin dış alanlarına önemli miktarlarda hidrojen ve helyum bırakacak kadar sıcaktır fakat aynı zamanda Güneş'ten yeterince uzak ve suyunun büyük bir bölümünü sıvı formunda tu- tacak kadar serindir. Güneş Sistemi'mizdeki diğer gezegenler gibi yaklaşık 4,5 milyar yıl kadar önce, birkaç milyon yıllık bir süre içinde temelde kondritlerin ve bunu izleyen yerçekimsel küme- lenmelerinin gittikçe daha geniş gezegenimsi yapılarla çarpışması sonucunda oluşmuştur.

Derin Zaman

Güneş'in, Dünya'nın ve Güneş Sistemi'mizin geri kalan kısmının doğuş biçiminin tüm kanıtlarına muazzam zaman aralıkları kavramı (4,5 milyar yıl ve daha fazlası) içkindir. Amerikalılar insanlık tarihindeki ünlü olayların tarihlerini alıntılamaı sever. Wright kardeşlerin 17 Aralık 1903'teki ilk uçuşu ve 20 Temmuz 1969'da bir insanın Ay'a ilk kez ayak basması gibi büyük başarı ve keşifleri kutlarız. 7 Aralık 1941 ve 11 Eylül 2001 gibi ulusal kayıp ve trajedi günlerini anlatırız. Doğum günlerini hatırlarız: 4 Temmuz 1776 ve elbette 12 Şubat 1809. (Charles Darwin ve Abraham Lincoln'un rastlantısal doğum günleri) Bu tarihsel anların geçerliliğine güveniriz çünkü bozulmamış yazılı ve sözlü kayıtlar bizi çok uzak olmayan o geçmişe bağlar.

Jeologlar da tarihsel zaman işaretlerini alıntılamaı sever: Yaklaşık 12.500 yıl önce, son büyük buzullaşmanın bittiği ve insanların Kuzey Amerika'ya yerleşmeye başladığı dönem; 65 milyon yıl önce, dinozorların ve başka pek çok yaratığın yok olduğu dönem; 530 milyon yıl kadar önce, sert kabuklu çeşitli hayvanların birdenbire ortaya çıktığı Kambriyen Dönem ve 4,5 milyar yıldan uzun bir süre önce, yeryüzünün Güneş'in yörüngesinde bir gezegen olduğu dönem. Fakat bu yaş tahminlerinin doğru olduğundan nasıl emin olabiliriz? Yeryüzünün antik kronolojisinin birkaç bin yılı geçen yazılı bir kaydı ya da bilgilendirici herhangi bir sözlü geleneği yoktur.

Dört buçuk milyar neredeyse tahminin ötesinde olan bir sayıdır. Mevcut Guinness dünya uzun yaşam rekoru, yüz yirmi ikinci yaşını kutlayacak kadar uzun yaşayan Fransız bir kadının elindedir, bu yüzden insanlar 4,5 milyar saniye (yaklaşık 144 yıl) için dahi olsa yaşam beklentisinin altında kalır. Kayıtlı insanlık tarihinin tamamı 4,5 milyar dakikadan çok daha azdır. Bununla beraber jeologlar yeryüzünün 4,5 milyar yıldan uzun süredir var olmuş olduğunu iddia eder.

Bu *derin zamanı* algılamanın kolay bir yolu yoktur ama bazen uzun yürüyüşlere çıkarak bunu yapmayı deniyorum. Annapolis, Maryland'in hemen güneyinde, otuz iki kilometrelik gösterişli, inişli çıkışlı, fosillerle dolu tepeler Chesapeake Körfezi'nin batı kıyısını yandan destekliyor. Toprak ve su arasındaki dar kum çizgisi boyunca yürürken, çok fazla sayıda yok olmuş istiridye, sarmal salyangoz, mercan ve yassı su kirpisi bulunabilir. Ara sıra, oldukça şanslı bir günde, on beş santimetre uzunluğunda çıkıntılı bir köpekbalığı dişi ya da iki metre uzunluğunda modern bir balina kafatası ortaya çıkar. Bu değerli kalıntılar on beş milyon yıl öncesinde, bölgenin bugünün Maui'si gibi daha ılık ve tropikal olduğu, görkemli balinaların yavrulamaya geldiği ve on sekiz metre uzunluğunda canavar köpekbalıklarının zayıf olanlarla ziyafet çektiği bir dönemi anlatır. Fosiller üç milyon yıllık yeryüzü tarihi üzerine serilmiş doksan metrelik düşey tortuyu doldurur. Kum ve kalkerli kil katmanları oldukça yavaş biçimde güneye doğru iner, dolayısıyla sahilde yürümek zaman içinde bir yolculuk gibidir. Kuzey yönünde her uzun adım, biraz daha eski katmanları açığa çıkarır.

Dünya tarihinin kapsamı konusunda bir fikir edinmek için zaman içinde geriye doğru yürüdüğünüzü hayal edin, her adımda yüz yıl -her adım üçten fazla insan nesline eşit olacaktır. 1,6 kilometre sizi 175.000 yıl geçmişe doğru götürür. Chesapeake kayalıklarında otuz iki kilometrelik, kesinlikle sıkı bir yürüyüş, üç milyon yıldan fazlasına eş değerdir. Fakat Dünya tarihinde küçük bir gedik açabilmek için bile, haftalarca bu hızda yürümeyi sürdürmeniz gerekir. Günde otuz iki kilometreyle yirmi günlük bir çaba ve her adımda yüz yıl sizi 70 milyon yıl geriye, dinazorların kitleli ölümünden hemen öncesine götürecektir. Beş ay boyunca yapılan otuz iki kilometrelik yürüyüşler 530 milyon yıldan fazlasına, Kambriyen "patlaması" dönemine, çok sayıdaki sert kabuklu hayvanın neredeyse eşzamanlı olarak ortaya çıkışına tekabül eder. Fakat adım başına yüz yıllla, yaşamın doğuşuna erişmek için yaklaşık

üç yıl ve yeryüzünün başlangıcına erişmek için yaklaşık *dört yıl* yürümeniz gerekir.

Nasıl emin olabiliriz? Yeryüzündeki bilim insanları, olağanüstü derecede yaşlı bir yeryüzüne (derin zamanın gerçekliğine) işaret eden sayısız kanıt geliştirmiştir. En basit kanıt, maddele-
rin yıllık tabakalaşmasını ortaya çıkaran jeolojik olgularda bulunur; katmanları sayın, yılları sayın. Bu türden jeolojik takvimlerin en dramatik olanları yıllık çökelti-
ler, sırayla daha iri taneli bahar tortularını ve daha ince kış tortularını temsil eden ince, değişken açık ve koyu katmanlardır. İsveç'teki buzul göllerinden titizlikle belgelendirilen bir sıralanımda, her yıl tortulaşan yeni bir aydınlık-karanlık katmanla birlikte 13.527 yıllık bir katmanlaşma tespit edilmiştir. Wyoming'de bulunan manzaralı dik duvarlı kan-
yonlarda sergilenen ve incelikli biçimde tabakalara ayrılmış olan Green River Shale, bir milyondan fazla yıllık katmanı olan kesin-
tisiz dikey bölümleri içerir. Benzer şekilde, Afrika ve Grönland'ın yüzlerce metre derinlerindeki buz dağı özleri, sekiz yüz bin yıldan uzun süreli, her yıl, kar katmanlarının birikimiyle oluşan bir biriki-
mi açığa çıkarır. Tüm bu tabakalaşmalar oldukça yaşlı kayala-
rın üzerinde yer alır.

Daha yavaş coğrafi süreçlerin ölçümleri Dünya tarihinin zaman skalasını daha da ileriye çeker. Lav örtüleri üst üste yığıldıkça büyük Hawaii adaları ağır ve düzenli volkanik aktiviteler gerektirmiştir; modern püskürme oranları temelinde en az on milyonlarca yıl. Apalaşlar ve diğer antik yuvarlak sıradağlar milyonlarca yıllık kademeli erozyon sonucunda oluşmuştur ve tektonik plakaların kıtaların yerini değiştiren ve okyanusları açan güçlkle tespit edilebilen hareketleri de milyonlarca yıllık döngülerle işlemektedir.

Fizik ve astronomi, daha az ikna edici olmayan derin zaman için kanıtlar sunar. Karbon, uranyum, potasyum, rubidyum ve diğer elementlerin öngörülebilir çürüme oranları, kaya oluşumuna yol açan, milyarlarca yıl geçmişe, Güneş Sistemi'nin oluşumuna uzanan olayların tarihlendirilmesi için sıra dışı ölçüde doğru

saatlerdir. Bir milyon radyoaktif izotop atomundan oluşan bir koleksiyonunuz varsa bunların yarısı “yarı yaşam” denilen zaman diliminde çürüyecektir. Örneğin milyonlarca uranyum 238 atomunu ardınızda bırakın ve 4.468 milyar yıllık yarı yaşamını tamamladığında geri dönün, geriye yalnızca yarım milyon uranyum-238 atomunun kaldığını göreceksiniz. Uranyumun geri kalanı diğer elementlerden oluşan yarım milyon atoma, nihayetinde sabit kurşun-206 atomlarına dönüşecektir. 4.468 milyar yıl daha beklerseniz yalnızca çeyrek milyon atomluk uranyumun kaldığını göreceksiniz. En yaşlı primitif kondritlerin yaş belirlenimlerine (4.566 milyar yaş) bu radyometrik tarihlendirme yöntemi yoluyla erişilir.

Peki ya Güneş Sistemi’nden *önceki* milyarlarca yıl? Astrofizikçilerin uzaktaki hareketli gezegenlere ilişkin ölçümleri 4,5 milyardan çok daha yaşlı bir evrene işaret eder. Tüm galaksiler hızla bizden uzaklaşmaktadır. Doppler kayması verileri -kızıla kayma denilen şey- daha uzaktaki galaksilerin daha da hızlı biçimde çekildiğini açığa çıkarır. O kozmik kaseti geriye sardığınızda her şey yaklaşık 13,7 milyar yıl öncesindeki bir noktaya yaklaşır. Bu Büyük Patlama’dır. En uzaktaki bu objelerin bazılarında gelen ışık, 13 milyar yıldan uzun süredir uzayda seyahat etmektedir.

Bu noktadaki verilerin doğruluğu tartışmasızdır. Dünya’nın yaşının on bin ya da daha az olduğu yönündeki her iddia, her bilim dalından baskın gözlemsel kanıta karşı koyar. Tek alternatif kozmosun on bin yıl kadar önce çok daha yaşlı görünecek biçimde yaratılmış olduğudur; bu ilk olarak Amerikalı natüralist Philip Gosse’nin 1857 yılında (annesiz Âdem, kendisini bir kadın doğurmuş gibi görünebilmesi için bir göbekte doğduğundan, Yunanca “göbek” sözcüğünden yola çıkılarak isimlendirilen) karmaşık tezi *Omphalos*’ta açıklanan bir sonuçtur. Gosse, oldukça yaşlı bir dünya için yüzlerce sayfalık kanıt listelemiş ve sonrasında Tanrı’nın on bin yıl önce nasıl her şeyi *çok daha yaşlı* görünecek biçimde yarattığını betimlemeye girişmiştir.

Bazıları *prechronism*² olarak bilinen bu yaratılışçı antikite boşluğunda huzur bulabilir. Astrofizikçilerin milyarlarca ışık yılı uzaktaki yıldız ve galaksiler üzerinde yaptıkları gözlemlere göre, prekronistler evrenin hâlihazırda yeryüzüne doğru ilerlemekte olan o yıldız ve galaksilerden, ışıkla yaratılmış olduğu cevabını verir. Antik radyoaktif ve kız ürün³ izotopları olan kayaların, gerçekte olduklarından çok daha yaşlı *görünmelerini* sağlayacak doğru uranyum, kurşun, potasyum ve argonla oluşturulmuş olduğunu iddia ederler. Bu prekronist inanca sahipseniz on birinci, “Gelecek” başlıklı bölüme geçmenizi öneririm. Aksi durumda, hayal gücünüzün birkaç milyar yıl geriye, gezegenimizin doğduğu döneme sıçramasına izin verin.

Dünya'nın 4,5 milyar yıl önceki doğuşu, evrenin tarihinde trilyonlarca kez tekrarlanmış olan bir dramdır. Her yıldız ve gezegen, uzayın müphem boşluğunda gaz ve tozdan doğar; bunlar tek başlarına çıplak gözle görülmek için çok küçük olan fakat bütününde, galaksinin ortasında, yıldız oluşturan devasa bulutlarda gözlemleyebileceğimiz kadar geniş olan maddelerdir. Bundan milyarlarca yıl kadar önce, yerçekimi Güneş Sistemi'nin doğuşuna yardımcı olmuştur, Güneş, cüce gezegenimsiler karmaşasında tek dev olarak ortaya çıkmıştır. Nükleer reaksiyonlar Güneş'in yüzeyini tutuşturmuş, gezegenimsi komşularını ışık ve sıcaklıkla çevrelemiştir. Böylelikle evimiz canlı bir dünya olma yolunda ilk tereddütlü adımlarını atmıştır.

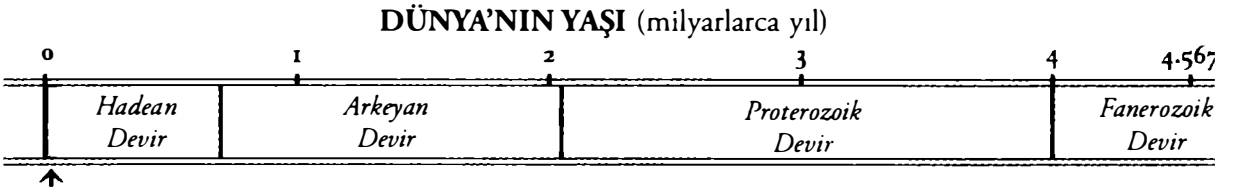
Bu türden epik olaylar, her ne kadar yabancı görünebilse de hepimiz yaşamımızın her gününde, yeryüzünün oluşumuyla sonuçlanan aynı kozmik olguları deneyimleriz. Yeryüzünü oluşturan element ve atomlar aynı zamanda vücutlarımızı ve yaşam alanlarımızı da oluşturur. Yıldız ve gezegenleri toz ve gazdan oluşturan ve elementleri yıldızlara dönüştüren evrensel yerçekimi gücü, aynı

2 Bir olayın olduğundan çok önce gerçekleşmiş gibi algılanmasına neden olan tarihlendirme hatası.

3 Orijinal radyoaktif izotopa “ebeveyn izotop” ve dönüşüm sonucu yeni oluşuma ise “kız ürün” adı verilir.

zamanda bizi Dünya'daki evimize sımsıkı bağlarla bağlar. Evrensel fizik ve kimya yasaları söz konusu olduğunda, Güneş'in altında yeni bir şey yoktur.

Kayaların, yıldızların ve yaşamın dersleri de aynı ölçüde nettir. Yeryüzünü anlayabilmek için kendinizi insan yaşamının sonuçsuz geçici ya da mekânsal yelpazesinden soyutlamalısınız. Her birinde milyarlarca yıldız bulunan yüz milyar galaksiden oluşan bir kozmosun içinde, tek bir küçük dünyada yaşıyoruz. Benzer şekilde her gün, milyarlarca günlük bir kozmosta yaşıyoruz. Kozmosta anlam ve amaç arıyorsanız bunu insan varlığıyla ilişkili herhangi bir öncelikli an ya da yerde bulamayacaksınız. Mekân ve zaman yelpazeleri oldukça anlaşılmasız biçimde geniştir. Fakat kaçınılmaz olarak, karşı konulmaz biçimde kendini bilme olasılığını vaat eden bir evrenle sonuçlanan doğa yasalarına bağlı bir kozmos, bilimsel çalışmaların da özünde ortaya koyduğu gibi, anlamla dolu bir kozmostur.



İkinci Bölüm

Büyük Darbe

Ay'ın Oluşumu

Dünya'nın Yaşı: 0 ila 50 milyon yıl arası

Bu kitabın temel prensiplerinden biri, gezegensel sistemlerin evrildiği, zaman içinde değiştiğidir. Dahası, her yeni evrimsel aşama, aşamaların önceki sıralanımına bağlıdır. Değişimler sıklıkla kademelidir, bir gezegenin çevresini dönüştürmek, milyonlarca, hatta milyarlarca yıl alır fakat ani, şiddetli ve geri dönüşsüz olaylar bir gezegeni dakikalar içinde sonsuza dek değiştirebilir. Dünya'ya da aynı şey olmuştu.

Yeryüzü, sayısız dağınık parçadan, görece hızlı biçimde, bazılarına göre bir milyon yıldan uzun olmayan bir süre içinde oluştu. Bu sürecin sonuna doğru, her biri birkaç yüz kilometre çapında birkaç düzine gezegenimsi yapı, ilksel Dünya'yla aynı yeri paylaşıyordu. Yaklaşık yüz bin yıllık bir süre içinde, gezegenimiz mevcut boyutuna yaklaşıırken, bu sürecin son aşamaları ölçülemez şiddet olayları şeklinde gerçekleşti. Birkaç yüz bin yılda bir, bir mini gezegen ilksel Dünya'ya çarptı ve bütün olarak yutuldu.

Bu çalkantılı dönemde, Dünya parıltılı kırmızı çatlaklarla, yükselen volkanik magma şelaleleriyle ve aralıksız meteor darbeleriyle bölünen sıcak, kararmış bir alandı. Dev ayrıştırıcıların her biri şiddetle yeryüzüne çarpıyor, buharlaşmış kayaları yörüngede patlatıyor ve yüzeyin tamamını erimiş, sıcaktan kıpkırmızı

kayalıklı bir çamura dönüştürüyordu. Ancak uzay soğuktur. Büyük darbenin ardından, yeryüzünün havasız yüzeyi hızla soğumuş ve yeniden kararmıştır.

Yabancı Ay

Dünya'nın kökenlerinin bu öyküsü, tek bir çarpıcı ayrıntı dışında tertipli ve düzenli görünür: Ay. Ay görmezden gelinmek için fazla büyüktür ve geride bıraktığımız iki yüzyılın büyük bir bölümünde, açıklanmasının oldukça güç olduğu ortaya çıkmıştır. Küçük uyduların anlaşılması kolaydır. Mars'ın yörüngesindeki şehir boyutunda iki düzensiz kaya, yakalanmış asteroidler gibi görünür. Jüpiter, Satürn, Uranüs ve Neptün'ün yörüngesinde bulunan çok daha geniş düzinelerce uydu, ev sahipleriyle karşılaştırıldığında çok küçüktür -çevreledikleri gezegenlerin kütlelerinin binde birinden çok daha küçük. Gezegen oluşturan özgün toz ve gazların sahipsiz kalıntılarından oluşan en büyük uydular, minyatür Güneş sistemlerindeki gezegenler gibi, gaz bulutundan oluşan bu gezegenlerin yörüngesine oturur. Buna karşılık Dünya'nın Ay'ı, yörüngesinde bulunduğu gezegenle karşılaştırıldığında görece büyüktür: Yeryüzünün çapının dörtte birinden fazlasına ve kütlelerinin yaklaşık seksende birine sahiptir. Peki bu türden bir anomali nasıl oluşmuştur?

Tarihsel bilimler, özellikle Dünya ve gezegen bilimleri, (gerçeklerle az çok uyumlu öykülere karşın) yaratıcı hikâye anlatıcılığına dayanır. Birden fazla hikâye gözlemlerle örtüşür gibi görünüyorsa jeologlar “çoklu geçici varsayım” olarak bilinen, dedektif romanlarını seven herkesin aşına olduğu bir strateji olan ihtiyatlı bir tavır benimser.

Apollo'nun 1969 yılında başlayan tarihi Ay inişlerinden önce, eski Ay taşları keşfedildiğinde ve Ay'ın iç yüzeyinin özenli jeofizik ölçümleri yapılabildiğinde, Büyük Ay vakasında üç baş zanlı öne çıkıyordu. Büyük oranda kabul gören ilk bilimsel hipotez, (natüralist babası Charles'dan çok daha az ünlü olan) George Howard Darwin'in, 1878 yılında sunulan fisyon teorisiydi. George Darwin'in

senaryosunda, ilkel eriyik Dünya kendi ekseninde öyle büyük bir hızla dönüyordu ki bir magma parçasını, Güneş'in yerçekimsel çekiminden çok az yardım alarak yüzeyden koparıp yörüngeye atana kadar geriliyor ve uzuyordu. Bu modelde Ay, serbest kalmış bir Dünya tomurcuğudur. Bu dramatik hikâyenin yaratıcı bir değişkeninde Pasifik Okyanusu havzası bir gösterge, toprak ananın doğum yarası olarak kalır.

İkinci bir rakip fikir olan yakalama teorisinde, Ay, oluşmakta olan Güneş Sistemi'nde, yeryüzüyle az çok aynı bölgede yer alan, ayrı olarak oluşmuş daha küçük bir gezegenimsi yapı olarak görülmüştür. Bir noktada, iki yapı, birbirinin, daha büyük olan yeryüzünün daha küçük olan Ay'ı yakalayarak onu yavaş yavaş sabitlenen döngüye doğru fırlatacağı kadar yakınından geçmiştir. Bu açgözlü yerçekimsel mekanizma, Mars'ın daha küçük kayalıklı uyduları için yeterince işlevsel görünüyordu, öyleyse neden Dünya için de aynı şey geçerli olmasındı?

Üçüncü hipotez olan ortak katılım teorisi, Ay'ın mevcut yerinde az çok yeryüzünün çevresindeki yörüngede kalan büyük bir çöküntü kalıntısı bulutundan oluştuğunu ortaya koyuyordu. Bu makul fikir, gaz bulutundan oluşan gezegenler ve onların uyduları kadar Güneş ve onun gezegenleri hakkında bildiklerimizi de taklit eder. Güneş Sistemi'nde tekrar tekrar görülen ortak bir konudur: Küçük objeler daha büyük objelerin çevresindeki toz ve gaz bulutlarından ve kayalardan oluşur.

Çelişen üç hipotez; hangisi doğru? Sorgulayıcı zihinlerin Ay kayalıklarından (altı Apollo iniş bölgesindeki 380 kilogramdan fazla örnekten) veri beklemesi gerekmiştir.

Ay'a İniş

Apollo Ay görevleri gezegen bilimini pek çok şekilde dönüştürdü. Elbette Amerikan teknolojik kahramanlığı ve cesareti için rakipsiz bir vitrin oldular. Şüphe götürmez biçimde, askeri-endüstriyel komplekse olağanüstü bir ivme kazandırdılar. 20 milyar dolar değerindeki görevleri pek çok kez karşılayabilecek bir ekonomik

güçlendirici sunarak, mini bilgisayarlardan polimere ve Tang'a kadar sayısız yeniliği tetiklediler. Bu masraflı ve tehlikeli ilk Ay görevleri için ay biliminin değil ulusal gururun ve "üstünlük" için yapılan yarışın temel güdüleyiciler oluşu şaşırtıcı değildir.

Böyleyken dahi, Apollo görevlerinin ve Ay kayaları definelerinin, benim Dünya bilim insanları neslim üzerindeki etkisini abartmak güç olurdu. İnsanlık tarihinin bütününde, Ay kışkırtıcı ölçüde yakın, kırk milyon kilometrenin yalnızca biraz altında bir uzaklıktaydı. Açık bir yaz akşamında, kızışmış dolunay yükselirken uzanıp ona dokunabilirmişsiniz gibi hissedersiniz. Ama bizim elimizde hiçbir örnek -bize Ay'ın neden, ne zaman ya da nerede yapıldığını kesin olarak söyleyecek hiçbir şey- yoktu. Ay'dan ilk örnekler aracılığıyla, insanlık tarihinde ilk kez (bugün her Smithsonian ziyaretçisinin yapabildiği gibi) gerçek anlamda Ay'a dokunabiliyorduk.

Benim gerçek anlamda ilk Ay örneklerim 1969-70 yıllarının kış aylarında, Massachusetts Teknoloji Enstitüsü'ndeki son sınıfımda, Apollo II'nin tarihi görevinin yarım yıldan az bir süre sonrasında geldi. Ortam birkaç ay öncesinde, 24 Temmuz 1969'da, Ay'da yürüyen ilk insanlar yeryüzüne döndüğünde oluşturulmuştu. Ay'ın keşfinin bu ilk günlerinde, yabancı mikropların bulaşmasına ilişkin kaygılar astronotlar ve örnekleri için katı karantina politikaları uygulanmasını gerektirdi. Dolayısıyla modülleri Hawaii yakınındaki Pasifik Okyanusu'na iner inmez, Neil Armstrong, Buzz Aldrin ve Mike Collins USS *Hornet* tarafından alınıp getirildi. Uzaydan getirdikleri kırk beş paha biçilmez taş ve toprak parçasıyla birlikte, NASA'nın Mobil Karantina Tesisleri'nde hava geçirmeyecek şekilde kapatıldılar. Tümü Hawaii'den Houston'a, Dünya'ya dönüşleri sırasında gerçekten tatsızlık yaratacak bir şeyin kendilerine eşlik etmesi ihtimali göz önünde bulundurularak, yaklaşık üç hafta boyunca, yalnızca uzay kâşiflerinin ve değerli örneklerinin tutulduğu yeni Ay Karşılama Laboratuvarı'na gönderildi.

Sonraki üç yıl boyunca Apollo görevleri hızla birbirini izledi. Apollo 12 Ay modülü *Intrepid*, astronotlar Charles Conrad, Jr. ve Alan Bean'le birlikte, 19 Kasım 1969'da iniş yaptı ve bir hafta

sonra, Houston karantina etkinliklerine iletilen yaklaşık otuz iki kilogram Ay taşı ve toprağıyla geri döndüler. Şans eseri, tez danışmanım olan parlak ve istekli David Wones, Apollo 12 Ay Örneği Birincil Araştırma Takımı'nın bir üyesiydi. Bu küçük bilim insanları grubu, taşınan ikinci değerli Ay örneğini, analitik makinelerin gelişmiş teçhizatıyla titizlikle incelemenin olağanüstü macerasını deneyimledi. Dave'in uzmanlık alanı volkanik petroloji –magma-dan oluşan taşların kökeni üzerinde yapılan çalışma- idi. Apollo II ve 12 Ay kayalarının tamamı özünde volkanikti, dolayısıyla bir jeolog cennetine düşmüştü.

Bazı açılardan, bir ayın büyük bir bölümü boyunca, başka birkaç titiz bilim insanıyla birlikte, bugüne dek toplanmış en pahalı ve önemli taş örneklerine ilişkin çürütülemez veriler toplama baskısı altında çalışmak güç bir işti. Fakat aynı zamanda, başka bir dünyadan gelen taşlara ve toprağa (bize Ay'ın kökenini kesin biçimde söyleyecek olan uzay maddelerine) dokunan ilk insanlar arasında olmak inanılmaz ölçüde heyecan vericiydi.

Benim Ay'ı yakından ilk görüşüm Dave'in Massachusetts Teknoloji Enstitüsü'ne dönüşüne denk geldi. Asansör kapısının Yeşil Bina'nın on ikinci katında açılışını hatırlıyorum. Dave orada, gösterişsiz bir havada ve gözlükleriyle, iki iri yarı, üniformalı, silah taşıyan federal ajanın nezaretindeydi. O noktada koleksiyoncuların piyasasında milyonlar değerinde olacak olan Ay örneklerini koruyorlardı. Her miligramın açıklanması gerekiyordu. Dave yorgun ve endişeli görünüyordu; uzun süredir uzaktaydı, sürekli gözlem altındaydı ve hâlâ yapması gereken bir iş vardı.

Ay örnekleri konusu açıldığında, pek çok kişi hemen Ay taşlarını düşünür, belki de elinizde tutabileceğiniz külçe hâlinde bir şey olduğu için. Fakat Apollo materyallerinin önemli bir bölümü Ay toprağı ya da regolitti. Regolitin en ince kumlu bölüntüsü, bir mikroskopla dahi çözümleyemeyeceğiniz küçüklükte parçaları olan toz hâlindeki taşlardır; bu, güçlü asteroidlerden aralıksız Güneş rüzgârına kadar bir dizi kozmik hasarın sonucudur. Bu ultra tozun tuhaf özellikleri vardır, bu özelliklerden en gözle görülür olanı, Xerox toneri gibi temas ettiği her şeye yapışmasıdır. Dave'in görevi,

bu tozun bir bölümünü yaklaşık olarak C pil boyutundaki bir küçük şişeden, yakındaki laboratuvarlara dağıtım için, daha küçük olan, yaklaşık AAA pil boyutundaki üç ya da dört daha küçük şişeye aktarmaktı.

Bu kulağa kolay geliyor. Tozu büyük şişeden yirmi santimetre-karelik cam yüzeyli toz kâğıt parçasına boşalt. Küçük oranları usulca daha küçük şişelere boşalt. Dave yüzlerce kez benzer işlemler yapmıştı ve bu bir dakikadan uzun sürmemeliydi. Fakat burada riskler daha fazlaydı. Her iki tarafta da şakadan anlamayan güvenlik görevlileri duruyordu; küçük bir öğrenci topluluğu da bekliyordu. Bu yüzden Dave'in eli büyük şişeye dokunurken biraz titredi. Yapışkan pudra camın iki tarafına yapışmış, çıkmak bilmiyordu. Ona işaret parmağıyla hafifçe vurdu. Hiçbir şey olmadı. Yeniden vurdu.

Sonra birdenbire Ay tozunun tamamı (gerçekte sadece bir Hershey öpücüğü boyutunda küçük bir yığındı, fakat mevcut koşullarda çok fazla görünüyordu) bir anda dağıldı ve sonra puff! Toz uçtu, Dave'in parmaklarını kapladı ve toz kâğıdının ucundan masanın üzerine düştü. Hiç kimse tek bir kelime bile etmedi.

Hiçbir şey kaybolmadığı, toz nihayetinde aktarıldığı ve federraller sonunda bölüntüleri diğer laboratuvarlara iletmek üzere ayrıldığı için bu gerçek bir felaket olmadı. Geçmişe baktığımızda, hepimiz bunun oldukça gülünç olduğunu düşündük. Birkaç gün içinde, transferin tamamlandığı laboratuvar tezgâhının üzerinde, o yirmi santimetre-kare toz kâğıdını düzgünce, Dave Wones'in Ay tozundaki sol işaret parmağının kusursuza yakın baskısıyla birlikte çerçeveletip astık.

Bunu dört Apollo Ay inişi daha izledi, 1972 yılının Aralık ayında Apollo 17 ve Taurus-Littrow Vadisi'nden, Ay volkanik faaliyetlerinin görüldüğü tahmin edilen bir yerden 110 kilodan fazla örneğin getirilmesiyle son buldu. Son görev buydu; kırk yıl boyunca kimse geriye dönmedi. Ancak Houston'da bulunan NASA Johnson Uzay Merkezi'nde, steril mahzenlerde sergilenen Ay kayaları

(San Antonio, Teksas'ta bulunan Brooks Hava Kuvvetleri Üssü'ndeki güvenli bir yedek koleksiyonuyla birlikte) araştırmacılara olağanüstü zenginlikte fırsatlar sunmayı sürdürüyor.

Son Apollo görevinden birkaç yıl sonra, bu örnekler Carnegie Enstitüsü Jeofizik Laboratuvarı'nda doktora sonrası araştırma görevlisi olarak ilk gerçek işime girmemi sağladı. İşim Apollo 12, Apollo 17 ve LUNA 20'den (aydan alınan örneklerin yaklaşık üçte birini geri getirmiş olan üç insansız Sovyet görevinin birinden) elde edilen toz yığınlarını incelemektir. Ay toprağının ince tozuna serpilmiş çok sayıda alüvyon ve kum boyutunda tanecik vardı ve benim heyecan verici işim bu taneciklerden binlercesini teker teker incelemektir. Bir mikroskobun başında, olağanüstü küçük yeşil ve kırmızı kristallere ve küçük altın renkli cam kürelere (milyarlarca yıllık meteor bombardımanına maruz kalarak şiddetle tahrip edilmiş kayaların kalıntılarına) bakarak saatler geçiriyordum.

Birkaç düzine umut vaat eden zerreyi ayırdıktan sonra, her sıra dışı taneciği üç türde analizden geçirdim. İlki bana ne tür bir kristalle uğraştığımı söyleyecek tek kristal X-ray kırılmasıydı. Çalışmalarımın büyük bölümünde yaygın olivin, piroksen ve spinel minerallerine odaklanıyordum. İyi bir kristal bulduğumda, taneciği dikkatlice yönlendiriyor ve optik soğurum tayfını (farklı ışık dalga boylarını emme biçimini) ölçüyordum. Örneğin yeşil olivin kristaller tipik olarak kırmızı dalga boylarını emer; buna karşılık kırmızı spinel kristalleri yeşil dalga boylarını daha fazla emer. Yanı sıra tüm sıra dışı cam boncuk tayflarını da ölçtüm, bu arada soğurma tayfında daha nadir elementlere (örneğin krom ve titanyuma) işaret eden gösterge çıkıntılarını ve kırıltıları da gözettim. 625 nanometrede küçük bir zirvenin, ayda görülen fakat yeryüzündeki kromdan oldukça farklı olan krom elementine özgü kırmızı-turuncu dalga boylarının hafif bir soğurumu unutulmaz bir "evreka" anıydı.

Sonunda, X-ray ve optik iş tamamlandığında, örneklerimdeki elementlerin net oranlarını belirleyebilmek için elektron mikroprob denilen fantezi bir analitik makine kullandım. Başkalarının bulmuş olduklarını tekrar tekrar doğruladım: Ay'ın yüzey

mineralleri, temel elementleri açısından yeryüzündekilere benzer olmakla birlikte ayrıntıda oldukça farklıdır. Daha fazla titanyum içerirler; krom da farklıdır.

Apollo kayalarından elde edilen bu ve diğer ipuçları, Ay'ın oluşum biçimine ilişkin çeşitli teorilere ciddi sınırlamalar getirmiştir. Öncelikle, öz kütlesinin çok daha düşük olması, büyük, yoğun bir demir metal özü olmayışı bağlamında, Ay'ın yeryüzünden çarpıcı biçimde farklı olduğu ortaya çıkmıştır. Yeryüzünün çekirdeği kütlesinin yaklaşık olarak üçte birini barındırır, öte yandan ayın küçük çekirdeği kütlesinin yüzde üçünden azdır. İkincisi, Ay taşları en uçucu elementlerin (bir şeyler ılındığı anda buharlaşma eğiliminde olanların) neredeyse hiçbir izini taşımaz. Yeryüzünün yüzeyinde oldukça sık görülen nitrojen, karbon, sülfür ve hidrojen Ay tozunda bulunmaz. Bu eksiklik sıvı suyla kaplı olan ve toprakları kil ve mika gibi suyun yoğun olduğu çokça mineral içeren yeryüzünden farklı olarak, Apollo görevlerinden herhangi bir türde su taşıyan hiçbir mineralin geri getirilmediği anlamına gelir. Bu buharlaşabilen maddelerin ortadan kalkması için bir şeyler Ay'ı patlatmış ya da kavurmuş olmalıdır, çünkü artık Ay'ın yüzeyi geri dönüşsüz biçimde kurudur.

Apollo görevlerinin üçüncü temel bulgusu oksijen elementi ya da daha spesifik olarak izotopların dağılımı üzerine kuruludur. Her kimyasal element çekirdeğindeki pozitif yüklü protonların sayısıyla tanımlanır. Sayı özgündür; *oksijen* yalnızca “sekiz protonlu atom” a verilen isimlerden biridir. Atom çekirdekleri ikinci türden bir parçacığı, elektriksel olarak nötr olan nötronu da içerir. Evrendeki oksijen atomlarının yüzde 99,7'sinden fazlasında sekiz nötron (sekiz proton artı sekiz nötron “oksijen-16” denilen bir izotopu oluşturur) bulunur, öte yandan dokuz ya da on nötronun bulunduğu daha nadir görülen izotoplar (sırasıyla oksijen-17 ve oksijen-18) bir yüzde bölüntüsünde mevcuttur.

Oksijen-16, oksijen-17 ve oksijen-18 kimyasal davranışları bağlamında esasen aynıdır -herhangi bir bileşimi soluyabilir ve bir fark görmezsiniz- fakat farklı kütleleri vardır. Oksijen-18, oksijen-16'dan daha ağırdır. Sonuç olarak, oksijen içeren bir bileşimin

katıdan sıvıya, sıvıdan gaza her durum değişikliğinde, daha küçük boyuttaki oksijen-16 daha kolay hareket edebilir. Yeni oluşmaya başlayan çalkantılı Güneş Sistemi'nde, bu türden durum değişiklikleri sıkça görülüyor ve değişen oranlarda oksijen izotoplarının oluşumuna yol açıyordu. Oksijen-16'nın oksijen-18'e oranının gezegenden gezegene değişiklik gösterdiği ve oluşumunda gezegenin Güneş'ten uzaklığına oldukça duyarlı olduğu ortaya çıktı. Apollo kayaları Ay'ın oksijen izotop oranının gerçekte yeryüzünününe eşit olduğunu açığa çıkardı. Diğer bir deyişle, Dünya ve Ay, Güneş'ten aynı uzaklıkta oluşmuş olmalıydı.

Öyleyse bu keşifler üç rakip Ay oluşum hipotezini nasıl etkilemiştir? Ortak katılım kuramı başlangıçtan itibaren sorunluydu. Eğer Ay Dünya'dan arta kalanlardan oluştuysa, benzer bir ortalama bileşimi olmalıydı. Doğru, Ay ve Dünya oksijen izotopları bağlamında örtüşür fakat ortak katılım kuramı demir ve uçucu maddelerdeki büyük farklılıkları açıklayamaz. Ay'ın yığınsal bileşimi yeryüzüyle aynı şeylerden oluşmuş olmak için fazla farklıdır.

Bileşimsel farklılıklar yakalama teorisi için de aşılma sorunlar yaratıyordu. Gezegen hareketinin kuramsal modelleri ele geçirilen her gezegenimsi yapının Güneş nebulasında, Güneş'ten Dünya'yla az çok aynı uzaklıkta oluşmuş olması gerektiğini, dolayısıyla ortalama bileşiminin az çok aynı olması gerektiğini ortaya koyar. Bu durum Ay için geçerli değildir. Elbette, Ay boyutunda bir obje, Güneş nebulasının farklı bir bölgesinde oluşmuş ve sonradan Dünya'nın yörüngesine girmiş olabilir fakat yörünge dinamiklerinin bilgisayar modelleri bu türden bir Ay'ın Dünya'ya oranla oldukça yüksek bir hızının olmasını gerektirir ve bu türden bir yakalama senaryosunu imkânsız kılar.

Bu George Howard Darwin'in fisyon teorisinden ayrılır. Benzer oksijen izotop kompozisyonlarını (Dünya ve Ay tek bir sistemdir) ve demir farklılığını (yeryüzünün özü hâlihazırda oluşmuştu; Ay'ı oluşturan küçük kütle Dünya'nın hâlihazırda farklılaşmış olan, demir oranı düşük kabuğunun bir parçasıydı) başarılı biçimde açıklayabilir. Bu, Ay'ın bir yüzünün her zaman Dünya'ya baktığı gerçeğini gereğince kanıtlar: Dünya'nın dönüşü ve Ay'ın yörüngesi

Dünya'nın eksenini çevresinde aynı dönüş hareketini takip eder -aynı dönüş yetisine sahiptir. Fakat büyük bir sorun varlığını korur: Artık Ay'da bulunmayan kayıp uçucu maddeler nerededir?

Fizik kanunları da fisyon teorisinin yolunu keser. Apollo görevleriyle yaklaşık olarak aynı dönemde, Dünya oluşumunun bilgisayar modellemesi, kuramcılarının hızla dönen Dünya boyutundaki magma topu üzerinde güvenle çalışabileceği noktaya kadar ilerlemişti. Basit biçimde ifade edilecek olursa, fisyon işlev göremez. Dünya'daki yerçekimi büyük bir erimiş kaya kütesinin dışarıya, yörüngeye itilmesine izin vermek için fazla güçlüdür. Aslında, Ay boyutunda bir topaktan kurtulması için eriyik bir Dünya'nın ekseninde inanılmaz bir oranda, yaklaşık olarak saatte bir dönmesi gerekirdi. Bunun olması için Dünya-Ay sisteminde basitçe yeterli açısal momentum yoktur.

Sonuç olarak, Ay oluşumunun genel üç kuramından hiçbiri Apollo görevlerinden sonraki verilerle örtüşmez. Bir başka açıklama olması gerekir.

Ay Kayalarının Tanıklığı

Gezegenler üzerinde çalışan bilim insanlarının iyi hikâye anlatıcıları olduğu şüphe götürmez. Apollo gözlemleri Ay'ın oluşumuna ilişkin 1969 yılı öncesindeki üç hipotezi de çürütmüştür fakat tartışılmaz gerçeklerden yola çıkarak yeni bir fikir geliştirmeleri uzun sürmemiştir. Apollo'dan gelen yeni bileşimsel ipuçları tek bir anahtar sunmuştur: Ay az çok Dünya'ya benzer. Oldukça düşük oranda demir ya da uçucu maddeye sahip olsa da aynı oksijen izotop bileşimine ve aynı temel elementlerin büyük bir bölümüne sahiptir. Bu bileşimsel verilerin binlerce yıldır bildiğimiz yörüngesel ipuçlarıyla bütünleştirilmesi gerekmiştir: Ay Dünya'nın çevresinde Güneş'in çevresindeki diğer gezegenlerle aynı düzlemde ve aynı yörüngeyi izler. Dünya'nın dönme ekseninde 23 derecelik detaycı bir eğim vardır (mevsimleri oluşturan şey budur). Ay'ın bir yüzü de her zaman bize dönüktür.

Ay oluşumunun daha eski modelleri, Güneş Sistemi'mizin genel şablonlarına göre çarpıcı bazı istisnaları olan Dünya-Ay sisteminin ötesindeki yörüngesel ipuçlarını göz ardı etme eğilimindeydi. Öncelikle, Venüs tüm diğer gezegenlere kıyasla kendi ekseninde geriye doğru döner. Bu önemli görünmeyebilir fakat Venüs Dünya'yla yaklaşık olarak aynı genişliktedir ve *yanlış yöne dönmektedir*! Daha da tuhaf olan dönüş eksenini çift yönlü olan üçüncü büyük gezegen, Uranüs'tür, dolayısıyla bir anlamda Güneş'in çevresindeki yörüngesinde ilerler gibidir. Diğer gezegen uydularının da tuhaflıkları vardır. Boyutu açısından Dünya'nın Ayı'yla karşılaştırılabilir olan Neptün'ün en büyük uydusu Triton'un yörüngesi, gezegenin dönüşüne dik bir açı oluşturur ve *Güneş Sistemi'nin geri kalan bölümünün aksi yönündedir*.

Bilim kültürünün tuhaf bir yönü vardır- bu oyunun içinde olmayanlar için rahatsız edici olabilecek bir özelliktir. Bir yandan pek çok tuhaf gerçeği bir araya getiren düzenli kuramlar geliştiririz. Böylelikle tüm gezegenlerin ve uyduların Güneş'in aynı yönde, aynı düzlemde yörüngesinde bulunduğu gerçeği, tek bir sarmal nebuladan gelen ortak bir kökene işaret eder. Fakat bu kuralın istisnalarını buluruz ve bu istisnalar tuhaf anomaliler olarak ayrılır. Venüs yanlış yönde mi dönüyor? Triton yanlış bir yörüngede mi? Sorun değil. Sapmaları daha geniş olan düzene özgüdür.

Aynı türden bir durum küresel ısınmaya ilişkin tartışma gibi pek çok toplumsal tartışmayı karmaşıktırır. Pek çok bilim insanı değişen hava koşullarının ortalama küresel ısıyı oldukça arttıracığını öngörür. Fakat bu türden değişiklikler aynı zamanda şiddetli hava koşullarına yol açabilir, bu da Amerika Birleşik Devletleri'nin güneyinde daha kötü kar fırtınaları oluşması anlamına gelebilir. Küresel ısınma Körfez Akıntısı gibi okyanus akıntılarını değiştirebilir ve nihayetinde Kuzey Avrupa'yı çok daha soğuk, Sibiryaya tipinde bir buzluğa dönüştürebilir. Bu türden anomaliler küresel ısınmayı reddedenleri teşvik eder: Bilim insanları Dünya'nın ısındığını söylüyor ama siz yakın zamanda bölgenizin tarihindeki en büyük kar fırtınasını yaşadınız. Tepkiniz ne olmalı? Makul bir tepki doğanın muhteşem olduğudur -zengin, çeşitli, karışık ve

karmaşık biçimde ilişkili, dağınık, uzun bir tarihi olan bir yapı. Anomaliler, gezegensel yörüngelerde ya da Kuzey Amerika havasında olsun, salt bir kenara bırakılacak uygunsuz ayrıntılar değildir: Bunlar gerçekte olup biteni (bir şeylerin gerçekte nasıl işlediğini) anlamanın özünü oluşturur. Doğanın işleyiş biçimine ilişkin büyük ve genel modeller oluştururuz ve daha sonra özgün kusurlu modeli iyileştirmek için tuhaf ayrıntıları kullanırız (ya da istisnalar kuralı bastırıyorsa yeni bir model çevresinde yeniden bir araya geliriz). İyi bilim insanlarının anomalilerden keyif almasının nedeni budur. Her şeyi anlasaydık, her şeyi öngörebilseydik sabah kalkıp laboratuvara gitmenin hiçbir anlamı olmazdı.

Dünya'nın Ay'ının kökeni söz konusu olduğunda, sistematik eğilimlerin -o detaylı yörüngesel anomalilerin- istisnaları, 1970'lerin ortalarında ortaya çıkan "Büyük Sıçrama" ya da "Büyük Darbe" modeliyle sonuçlanmıştır. İlişkili fakat yetersiz biçimde sınırlı hipotezler bütünü, gezegen oluşum uzmanlarının tüm seçeneklerini değerlendirmek üzere bir araya geldiği oldukça önemli 1984 Hawaii konferansında yaygın bir inanışa dönüşmüştür. Bu türden zorlu bir çevrede, Ockham'ın usturası -bir soruna getirilen gerçeklerle tutarlı en basit çözümün, doğru olma eğilimi taşıması talebi- varlığını sürdürür. Büyük Darbe gereken özelliklere sahiptir.

Bu radikal fikri anlamak için, 4,5 milyar yıl öncesini, gezegenlerin bütün o daha küçük gezegenimsi yapılardan oluştuğu dönemi düşünün. Dünya bugünkü on üç bin kilometrelik çapına yaklaştıkça, neredeyse kalan tüm yakın yapıları bir dizi büyük darbeye yuttu. Yüzlerce kilometre uzaktaki objelerle o sondan önceki çarpışmalar muhteşem olabilirdi fakat çok daha büyük olan baş gezegen, yani Dünya üzerinde çok az etkileri oldu.

Ne var ki tüm etkiler eşit değildir. Dünya tarihinde tek bir olay (tüm diğer günlerden daha unutulmaz bir gün) öne çıkar. Bundan 4,5 milyar yıl kadar önce, Güneş Sistemi yaklaşık 50 milyon yaşındayken, siyah ilksel Dünya ve biraz daha küçük olan gezegen boyutunda bir rakip, aynı sınırlı Güneş Sistemi için yarışıyordu. Daha küçük olan (Ay'ı doğuran Titan tanrıçasından esinle Theia adı verilen) gelecekteki gezegen, gezegen statüsünü hak ediyordu

-belki Mars'ın iki ya da üç katı (ya da kabaca Dünya kütlelerinin üçte biri) kadardı. Astrofiziğin kurallarından biri, iki gezegenin hiçbir şekilde aynı yörüngeyi paylaşamayacağıdır. Nihayetinde çarpışacaklar ve daha büyük olan gezegen her zaman kazanacaktır. Dünya ve Theia için de bu böyle oldu.

Gitgide artan canlılıktaki bilgisayar simülasyonları, bilim insanlarının ne olmuş olabileceğini anlamaya çalışmasına aracı olan temel yöntemi sunar. Büyük bir patlamayı yöneten fizik kanunlarıdır, dolayısıyla sonunda bir uydunun oluşup oluşmadığını görmek için, her türden birincil koşulla yüzlerce simülasyon yürütülebilir. Cevap başlangıç parametreleriyle yakından ilişkilidir: İlkse Dünya'nın kütlesi ve kompozisyonu, Theia'nın kütlesi ve kompozisyonu, göreceli hızları ve darbenin açısı ve doğruluğu. Pek çok bileşim basit biçimde işe yaramaz; bir Ay oluşmaz. Fakat birkaç model şaşırtıcı ölçüde başarılıdır ve bugün gördüğümüze oldukça benzer bir Dünya-Ay sistemi oluşturur.

Sıklıkla betimlenen bir versiyonda, etki somut bir yan darbe olarak gerçekleşir- büyük Theia daha büyük olan Dünya'ya merkezden biraz uzakta darbe indirir. Uzaydan görüldüğünde olay ağır çekimde gerçekleşir. Temas anında iki dünya başlangıçta usulca öpüşür gibi görünür. Daha sonra, bunu izleyen dört beş dakika içinde, Theia yere düşen yumuşak hamurdan bir top gibi ezilir ve Dünya üzerinde pek fazla etki görülmez. On dakika sonra Theia oldukça fazla ezilmiştir, öte yandan Dünya yuvarlak şeklini kaybetmeye başlar. Çarpışmadan yarım saat sonra, Theia tamamen yok olmuştur, öte yandan yaralanan Dünya artık simetrik bir daire değildir. Aşırı sıcak kaya, buharlaşmış, açık yaradan ışıltılı akıntılar hâlinde fişkırmakta ve bozulan dünyaları gizlemektedir.

İlk kez 1970'lerde sunulan ve bunu izleyen yirmi yıl içinde gözden geçirilen çokça alıntılanmış bir başka senaryo, Harvard-Smitsonian Astrofizik Merkezi kuramcısı Alastair Cameron tarafından geliştirilmiştir. Cameron'un etkileyici şemasında Theia İlkse Dünya'nın kütlelerinin kabaca yüzde kırkı kadardı. Yine merkez dışında bir etki gerçekleşti fakat bu versiyonda Theia az çok Dünya'ya çarpmıştı, sonrasında uzatılmış küçük bir kütle olarak sekti

ve daha sonra *coup de gr ce*⁴ -Theia'nın sonsuza dek yok olduğu ikinci bir darbe- için geri çekildi.

Her iki durumda da felaket Theia'yı yok etti ve Theia, Dünya'yı çevreleyen on binlerce derece sıcaklığında muazzam büyüklükte, parlak bir bulut şeklinde buharla tı. Theia da verebileceği zararı vermişti. Dünya'nın kabuğunun ve örtüsünün gözle görülür bir parçası da buharla tı ve Theia'nın dağılan kalıntılarıyla karı acak biçimde dışarıya doğru patladı. Maddelerden bazıları uzayın derinliklerine savruldu fakat zarar gören kalıntıların büyük bölümü yeryüzünün inatçı yerçekimsel kavrayı ıyla yörüngede tutuldu. Bu yuvarlanan buluttan, her iki dünyanın özlerindeki yoğun metal karı tı, soğuyarak sıvıya dönüştü ve Dünya için yeni, daha büyük bir çekirdek oluşturacak biçimde çöktü. Yer kabuğu maddeleri de karışarak buharla tı ve yerküreyi çevreleyen korkunç derecede sıcak bir buharlaşan kaya bulutu oluşturdu. Birkaç zorlu gün ya da hafta boyunca, Dünya sınırsız, kırmızı parıltılı magma okyanusuyla birleşen turuncu sıcağı silikat damlacıkların bitimsiz yağmurunu deneyimledi. Nihayetinde Dünya daha önce Theia'ya ait olanların büyük bölümünü sahiplendi ve böylelikle daha büyük bir gezegen olarak ortaya  ıktı.

Ancak Theia'nın tamamı ele ge irilmemi ti. Uzayın derinliklerinde, Dünya, kayalıklı çarpışma enkazının geniş bir birikimiyle, büyük oranda iki gezegensel yer kabuğunun yakın bir bile imiyle  evrelenmi ti. Soğuyan kayalıklı damlacıklar birleşti ve daha büyük parçalar daha k  k olanları süpürdü. Temelde gezegenleri oluşturan yerçekimsel k mele menin bir tür anlık tekrarıyla birlikte, Ay hızla bütün hâline gelmiş ve birkaç yıl içinde bugünkü boyutuna az çok eri mi  olabilir.

Gezegen oluşumunun fiziği Ay'ın nerede biçimlenmiş olabileceğini belirler. Aşırı derecede büyük her objenin Roche sınırı denilen görünmez bir çevreleyici alanı vardır, bu alanın içindeki yerçekimsel g  ler bir uydunun oluşması için fazla büyüktür. Bu

4 (Fr.)  ld r c  darbe ya da son darbe. ( .n)

yüzden Satürn'ün yüzeyinin yaklaşık seksen bin kilometrelik yüzeyinde devasa çemberler olmakla birlikte hiçbir uydu yoktur. Satürn'deki yerçekimi o buzlu parçacıkların bir uydu oluşturacak biçimde birleşmesini engeller.

Dönen bir objenin merkezinden hesaplandığında, yeryüzünün Roche sınırı yaklaşık 18.000 kilometre ya da yüzeyden yukarıya doğru kabaca 11.000 kilometredir. Dolayısıyla, Ay oluşumunun modelleri yeni uyduyu yaklaşık 24.000 kilometre yukarıdaki, Büyük Darbe'den dağılan parçaların büyük bir bölümünü temizleyerek sistemli olarak büyüyebileceği güvenli bir mesafeye yerleştirir. Böylelikle, pek çok tahmine göre muhtemelen 4,5 milyar yıl kadar önce Ay doğmuş, Dünya kendisini büyük oranda kendinden arta kalanlardan şekillenmiş olan bir arkadaşla bir arada bulmuştur.

Bilim insanları Büyük Darbe kuramını hemen benimsemişlerdir çünkü bu kuram temel ipuçlarını diğer tüm modellerden daha iyi açıklamaktadır. Ay demir bir çekirdekten yoksundur çünkü Theia'nın demirinin büyük bir bölümü Dünya'nın içinde saklıdır. Ay uçucu maddelerden yoksundur çünkü Theia'nın uçucu maddeleri darbe sırasında tahrip olmuştur. Ay'ın bir yüzü her zaman Dünya'ya bakmaktadır çünkü Dünya'nın ve Theia'nın açısal momentumu tek bir dönüş sisteminde birleşir.

Büyük Darbe aynı zamanda yeryüzünün yaklaşık 23 derece-lik tuhaf eksenini de açıklamaya yardımcı olur -bu geçmişteki senaryoların herhangi birinde iyi ele alınmamış bir etmendir. Theia darbesi yeryüzünü gerçek anlamda bulunduğu yöne eğmiştir. Gerçekten de Ay'ı dev bir darbenin oluşturmuş olduğunun farkındalığı, Güneş Sistemi'mizdeki diğer gezegensel tuhaflıklar hakkında tahminler yapılmasına yol açmıştır. Belki de herhangi bir türdeki son Büyük Darbe olayları yaygın, hatta gereklidir. Belki de bu Venüs'ün ekseninde neden yanlış yönde döndüğünü ve suyunun büyük bir bölümünü neden kaybettiğini açıklar. Belki de son dönemdeki dev bir darbe Uranüs'ün bulunduğu yöne dönmesine yol açmıştır.

Farklı Bir Gökyüzü

Ay'ın oluşumu oldukça şaşırtıcı ve yeni yeni anlaşılan uzun vadeli sonuçlarıyla, Dünya tarihinde çok önemli bir andı. 4,5 milyar yıl öncesinin Ay'ı, bugün gördüğümüz romantik, gümüşümsü yuvarlak levha değildi. Uzun zaman önce, Dünya'nın yüzeye yakın çevresinde çok daha büyük, dominant ve hayal edilemeyecek ölçüde yıkıcı bir etkiydi.

Bunların tümü bizi tek bir büyüleyici gerçeğe götürüyor: Ay, Dünya'nın yüzeyinden yalnızca 24.000 kilometre uzakta oluşmuştur; bu Washington'dan Melbourne, Avustralya'ya yapılan bir uçak yolculuğundan çok daha uzun bir mesafe değildir. Buna karşılık bugün, Ay 385.000 kilometre uzaklıktadır. İlk bakışta dev bir Ay'ın Dünya'dan öylece uzaklaşabilmesi oldukça inanılmaz görünür fakat ölçümler yalan söylemez. Apollo astronotları Ay yüzeyinde ısıtılı aynalar bırakmıştır. Dünya'dan gelen lazer ışınları aynalardan seker ve yeryüzüne dönerek üç santimin küçük bir bölüntüsüne uygun uzaklık ölçümleri sağlar. 1970'lerin başlarından bu yana her yıl, Ay daha da uzaklaşmıştır: Her yıl 3,82 santimetre ve yıllık ortalama yaklaşık beş santimetre. Bu rakam kulağa fazla gelmiyor fakat zaman içinde artıyor -mevcut oranlarda kırk bin yılda bir 1,60 kilometre dolaylarında. Kaseti geriye sardığınızda, bu 4,5 milyar yıl öncesinde radikal ölçüde farklı bir duruma işaret ediyor.

Öncelikle, Ay bütünüyle farklı *görünüyordu*. 24.000 kilometre uzaklıkta, 3.500 kilometre çapındaki bir Ay, daha önce gördüğümüz hiçbir şeye benzemeyen devasa bir görünümdeydi. Gökyüzünde yaklaşık 8 derecelik bir arkı (kabaca Güneş'in gözle görülür çapının on altı katı kadarını) kapsıyor ve gökyüzünün ayın bugünkü hâliyle kapladığının iki yüz elli katından fazla yer kaplıyordu.

Hepsi bu da değil. İlksel Ay, bugün gördüğümüz statik gümüşümsü-gri objeden oldukça farklı biçimde, yoğun bir volkanik faaliyet içeren zorlu bir yapıydı. Yüzeyi, kırmızı, magma dolu parıltıya dayanan çatlaklar ve yeryüzünden kolaylıkla görülebilen volkanik havzalarla, siyah görünüyordu. İlkel dolunay da aynı ölçüde dramatikti, yüzey modern çağımızda olduğundan yüzlerce kat daha

fazla Güneş ışığı yansıtıyordu. Parlak ışığı altında kolaylıkla bir kitap okuyabilirdiniz fakat astronomik gözlemler sonuçsuz kalırdı. Genç ayın yoğun pırıltısı altında hiçbir yıldız ya da gezegen görülemezdi.

Bu dönemde her şeyin oldukça hızlı hareket ediyor oluşu da dramatik durumu güçlendiriyordu. Uzayda hiç sürtünme yoktur, bu yüzden dönen objeler milyarlarca yıl boyunca dönmeyi sürdürür. Ay ve Dünya gibi dönen sistemler bir açısall momentum özelliğine sahiptir -bu iki bilindik dairesel hareketin bileşimiyle ölçülen bir miktardır. Bunlardan ilki yeryüzünün kendi eksenini etrafında dönüşüdür; Dünya ne kadar hızlı dönüyorsa o kadar fazla açısall momentuma sahiptir. Öte yandan, Ay'ın açısall momentumu öncelikle yörüngesinin Dünya'nın çevresinden ne kadar uzakta ve ne kadar hızlı olduğuna bağlıdır. Kendi dönüşü eşitliğin önemli bir kısmını oluşturmaz.

Dünya'nın dönüşünün ve Ay'ın yörüngesinin toplamdaki açısall momentumu geride bıraktığımız milyarlarca yıl içinde gözle görülür biçimde farklılaşmamış fakat bu iki hareketin göreceli önemi oldukça fazla değişmiştir. Bugün Dünya-Ay sisteminin neredeyse tüm açısall momentumu, 385.000 kilometrelik uzaklığı ve yirmi dokuz günlük yörünge periyoduyla yörüngedeki Ay'a bağlıdır. Acelesiz yirmi dört saatlik günüyle daha büyük olan merkezdeki Dünya, Ay'ın açısall momentumunun ancak küçük bir bölüntüsüne sahiptir. (Aynı şekilde, merkezdeki Güneş kütlenin yüzde 99,9'una sahip olsa da uzaktaki gaz bulutundan oluşan gezegenler Güneş Sistemi'nin açısall momentumunun neredeyse tamamını taşır.)

Fakat bundan 4,5 milyar yıl kadar önce, her şey oldukça farklıydı. Ay yalnızca 24.000 kilometre uzaktaydı ve her şey, dönüşünü hızlandırmak için kollarını içeri çeken bir buz patenci gibi gülünç biçimde hızlı dönüyordu. Öncelikle, Dünya beş saatte bir eksenini etrafında dönüyordu. Güneş'in çevresinde dolaşmak hâlâ bütün bir yıl (yaklaşık 8.766 saat) alıyordu; bu zaman Güneş Sistemi'nin tarihinde çok fazla değişmedi.

Bu türden bir tahmin tuhaf ve test edilemez görünür fakat en azından birkaç dolaysız ölçüm, daha kısa eski günlere ilişkin bu fikri doğrular. Mercan kayalıkları inandırıcı bir kanıt türüdür. Bazı mercan türleri hem incelikli günlük, hem de daha gözle görülür yıllık döngüleri kaydeden gitgide daha ince bir yelpazede büyüme çizgileri ortaya koyar. Beklendiği gibi, modern mercanlarda, büyüdükları her yıl için yaklaşık 365 günlük çizgi görülür. Fakat yaklaşık dört yüz milyon yıl öncesinden, Devoniyen Dönem'den kalan antik mercan fosilleri, her yıl için dört yüzden fazla günlük çizgi ortaya koyar ve bu da daha hızlı bir dönüş oranına işaret eder. O dönemde, Ay Dünya'ya muhtemelen on altı bin kilometre daha yakinken, günler yaklaşık yirmi iki saatten ibaretti.

İkinci, tamamlayıcı bir ölçüm, akıntıların günlük, Ay'a ait ve yıllık döngülerini açığa çıkaran ince katmanlı tortular olan ahenkli gelgit çökelti tabakaları olgusuna dayanır. Utah'daki Büyük Cottonwood Kanyonu'nda bulunan dokuz yüz milyon yaşındaki kayalardan mikroskobik gelgit çökelti tabakaları çalışmalarının çıkarılması, yeryüzündeki günlerin yalnızca 18,9 saat olduğu, her yılda 464 gün -464 gün doğumu ve batımı- olmuş olabileceği bir Dünya'ya işaret eder. Dünya ile Ay arasındaki, bu dönemde hesaplanan 350.800 kilometrelik mesafe, modern zamanlardakilere oldukça benzer bir durgunluk oranına işaret eder, bu yıllık 3,9 santimetre kadardır.

Çılgın Dünya

Henüz hiçbir dolaysız kanıt, yeryüzünün gelgitsel döngülerini bir milyar yıldan uzun bir süre öncesine dönük olarak belgelememektedir fakat bundan 4,5 milyar yıl kadar önce, her şeyin çok daha vahşi olduğundan emin olabiliriz. Dünya'da günlerin beş saat sürmesi bir yana, yakınlardaki Ay da yakındaki yörüngesinde çok daha hızlıydı. Ay'ın Dünya çevresinde dolaşması yalnızca seksen dört saat (üç buçuk modern gün) alıyordu. Hem Dünya'nın hem de yörüngesindeki Ay'ın hızla dönmesinden ötürü, yeni ayın, büyüyen ayın, dolunayın ve küçülen ayın bilindik döngüsü çılgınca

bir hızla ilerliyordu: Gün içinde her beş saatte bir yeni bir Ay döngüsü görölüyordu.

Bu gerçeğin, bazıları diğerlerinden daha az iyicil olan pek çok sonucu vardır. Gökyüzünde bu denli büyük bir Ay engeli ve bu denli hızlı yörüngesel hareketlerin olmasından ötürü, tutulmalar sıkça görülen olaylardı. Tam bir Güneş tutulması, neredeyse her yeni ayda, Ay Dünya ve Güneş arasında konumlandığında gerçekleşiyordu. Güneş ışığı birkaç dakikalığına bütünüyle engelleniyor, bu sırada yıldızlar ve gezegenler siyah bir göğün altında birden beliriyor ve Ay'ın ateşli volkanları ve magma okyanusları, Ay'ın siyah yuvarlak levhası karşısında kıpkırmızı renkleriyle öne çıkıyordu. Tam Ay tutulmaları da düzenli biçimde, yaklaşık kırk iki saatte bir, kurulmuş bir saat gibi gerçekleşiyordu. Dünya'nın Güneş ve Ay'ın arasında kaldığı her dolunayda, yeryüzünün büyük gölgesi ışıltı ışıltı parlayan Ay'ın dev yüzünü gizliyordu. Ay'ın volkanları canlı gösterilerini yaparken, yıldızlar ve gezegenler siyah gökyüzünün altında bir kez daha birdenbire ortaya çıkıyordu.

Dev gelgitler Ay'ın ilk yakınlığının çok daha şiddetli bir sonucuuydu. Hem Dünya hem de Ay kusursuz ölçüde sabit, katı yüzeyli yapılar olmuş olsaydı bugün de 4,5 milyar yıl önceki hâllerine oldukça benzer görünürlerdi: Hızlı dönüşlü ve yörüngesel hareketler ve sıkça görülen tutulmalarla birbirlerinden 24.000 kilometre uzakta. Fakat Dünya ve Ay katı yapılar değildir. Kayaları esneyip bükülebilir; özellikle eridiklerinde, kabarır ve akıntılarla birlikte çekilirler. 24.000 kilometre uzaklıktaki genç Ay, Dünya büyük oranda eriyik olan Ay yüzeyi üzerinde eşit ve zıt bir yerçekimsel güç uyguladığında bile, Dünya'nın kayaları üzerinde olağanüstü bir gelgitsel güç kullanmıştır. Ortaya çıkan sınırsız magma gelgitlerini hayal etmek güçtür. Dünya'nın büyük oranda eriyik olan kayalık yüzeyi birkaç saatte bir dışarıya, Ay'a doğru birkaç kilometre ilerleyebilir, bu şekilde daha fazla ısı ekleyerek, dolayısıyla yüzeyi ıssız bir gezegende olduğundan çok daha uzun süre eriyik hâlde tutarak olağanüstü bir içsel sürtünme oluşturabilirdi. Yeryüzündeki yerçekimi de Ay'ın Dünya'ya bakan yüzünü dışarıya

doğru kabartarak ve uydumuzun kusursuz yuvarlaklığını bozarak karşılık verirdi.

Bu epik gelgitsel bozulmalar, Ay'ın Dünya'dan uzaklaşmayı sürdürmesinin temel nedenidir. 3.476 kilometre genişliğinde bir obje nasıl olup da salt 24.000 kilometreden 385.000 kilometreye kadar uzanan bir aralıkta sürüklenebilir? Cevap açısal momentumun (yeryüzünün açısal momentumuyla ayın açısal momentumunun) korunmasında gizlidir. Fizik kanunları, Dünya-Ay sisteminin açısal momentumu başlangıçta ne olmuş olursa olsun, bugün de büyük oranda korunuyor olması gerektiğini dikte eder.

Bundan dört buçuk milyar yıl kadar önce, büyük bir gelgitsel çıkıntı, birkaç saatte bir yeryüzünü çevreliyordu. Fakat Dünya'nın yüzeyi eksenini çevresinde Ay'ın aynı eksen çevresindeki dönüşünden (seksen dört saatte) daha hızlı (beş saatte) tamamladığından, gelgitsel çıkıntı fazladan kütlesiyle her zaman önde oluyor, yerçekiminin gücüyle Ay'ı sürekli çekiyor, her yörüngede Dünya'dan Ay'a açısal momentumu aktarıyordu. İlk kez yaklaşık dört yüz yıl kadar önce, Alman matematikçi Johannes Kepler'in önerdiği değişmez gezegensel hareket yasaları, bir uydu ne kadar fazla açısal momentuma sahipse merkezdeki gezegeninden o kadar uzak olması gerektiğini ortaya koymuştur. Ay, her yörüngede, karşı konulamaz biçimde Dünya'dan uzaklaşmıştır.

Dünya'nın gelgitsel çıkıntısının Ay'ı çekişiyle aynı sırada, gelgitsel açıdan zarar gören Ay, eşit oranda ve zıt bir yerçekimsel güçle Dünya'nın devasa çıkıntısını yeniden çekmiş, böylelikle Dünya'nın her seferinde eksenini etrafında daha yavaş dönmesine neden olmuştur. Açısal momentumun korunması bu noktada devreye girer. Ay'ın Dünya'nın çevresindeki dönüş hızını arttırdığı oranda Dünya'dan uzaklaşması gerekiyordu ve daha fazla açısal momentum kazanıyordu. Dünya'nın, Dünya-Ay sisteminin toplamdaki açısal momentumunu koruyarak dengeyi kurabilmesi için eksenini etrafında gittikçe daha hızlı dönmesi gerekiyordu -yine kollarını bir kez daha uzatan ve dönüşünü yavaşlatan patenci figürünü düşünün. Dünya'nın dönüş hızı, 4,5 milyar yıllık bir zaman diliminde, beş saatte birden yirmi dört saatte bire dönecek kadar

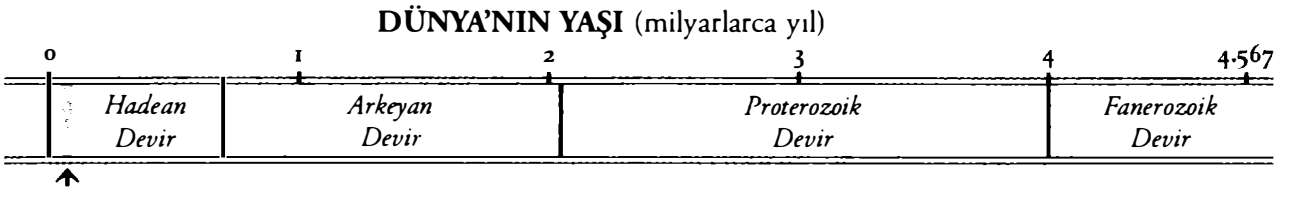
yavaşlamıştır. Öte yandan bu süreçte Ay daha da uzaklaşmış ve oldukça fazla açısal momentum kazanmıştır.

Her gezegen-uydu sisteminde bu olaylar dizisinin görülmesi gerekmez. Şayet gezegen eksenini etrafında uydusunun yörüngedeki hareketinden daha yavaş dönüyorsa, değiştirilemez bir frenleme etkisi oluşur. Gezegen üzerindeki gelgitsel çıkıntılar bunu izleyecektir; uydu yörüngeden her geçişinde yavaşlayacak ve sonuna gittikçe daha çok yaklaşacaktır. Nihayetinde uydu helezon çizerek gezegene çarpacak ve Büyük Darbe'nin farklı bir biçimiyle, yutulacaktır. Belki de yanlış yönde dönen Venüs'ün bir uyduya sahip olmayışının nedeni budur. Belki de bir zamanlar yörüngede olan uydunun bu şekilde, dehşet verici biçimde ölüşü Venüs'ün suyunu kaybedişini ve bugün düşmanca, kaynama noktasında sıcak ve hayatın olmadığı bir gezegen oluşunu açıklar.

Dünya-Ay sistemi tarihinin ilk evrelerinde, yavaşlayan Dünya'dan hızlanan Ay'a bu açısal momentum değişimleri, bugün olduğundan çok daha fazlaydı. Ay'ın oluşumundan sonraki ilk yüzyıllar içinde, her iki yapı da esneyebilen ve deforme olabilen çalkantılı magma okyanuslarıyla kuşatılmıştı. Dünya'daki dev magma gelgitleri ve Ay'daki benzer magma kabartıları, muhtemelen, Dünya'nın dönüşü ilk şiddetli hızından uzaklaşarak kademeli olarak yavaşlarken bile, yılda onlarca ya da yüzlerce metre uzaklaşmasına yol açmıştır. Fakat bu muazzam kara gelgitleri uzun süreli olamazdı. Dünya'nın Ay'a uzaklığı arttıkça gelgitsel güçler daha da azalıyordu: Mesafenin ikiye katlanması yerçekimi gücünü dört kat kadar azaltıyordu. Mesafe üçe katlandığında yerçekimsel güçler geçmişteki dirençlerinin dokuzda birine sahip oluyordu.

Tekrarlanan gelgitsel gerilim dünyaların katılaşmasını geciktiriyor fakat durduramıyordu. Büyük Darbe'yi izleyen birkaç milyon yıl içinde, hem Dünya'nın hem de Ay'ın yüzeyleri katı siyah kayalarla doluydu. Kara gelgitleri -sağlam kayanın biçimsizleşmesi- o ilk günlerde hâlâ önemsiz değildi fakat magma denizinin kendilerinden önceki güçlü günlük kabarmalarına hiç benzemiyordu.

Ay, evrenin iç içe geçmiş bir yaratı ve yıkım mekânı olduğunun parlak bir hatırlatıcısı olma özelliğini sürdürür. Bugün bile, felaket niteliğinde kozmik hasarlardan bağımsız değiliz: Katil asteroidler ve kuyrukluysıldızlar hâlâ zaman zaman Dünya'nın yörüngesinden geçer. Bundan milyonlarca yıl kadar önce, büyük bir kaya dinozorları öldürmüştür; bundan sonraki milyonlarca yıl içinde de diğer büyük kayalar kaçınılmaz olarak izlerini bırakacaktır. İnsanın varlığını sürdürmesi tür olarak en büyük ortak zorunluluğuyorsa, gökleri izlemeyi sürdürmekle isabetli hareket etmiş oluruz, çünkü en yakındaki kozmik komşumuz sessiz bir tanıklık sunar: Değişim çoğunlukla kademeli ve iyicildir ancak gerçekten kötü günler de olabilir.



Üçüncü Bölüm

Kara Toprak

İlk Bazalt Tortusu

Dünya'nın Yaşı: 50 ila 100 milyon yıl arası

Dünya, uzun tarihinde birkaç dönüştürücü olaydan daha fazla eziyet çekmiştir. Büyük Darbe kesinlikle bunların içinde en yıkıcı olanıdır ve sonraki dönemde, Ay'ın oluşumu sürecinde, muhtemelen sonuçları oldukça fazla olan etkileri olmuştur. Fakat bu türden bir sonuç -tek başına büyük bir Ay'ın uçucu maddelerle dolu bir gezegenin yörüngesinde olması- hiçbir şekilde kimya ve fizik yasalarının kaçınılmaz bir sonucu değildir. Dünya ve Theia arasındaki o antik etkileşimin ayrıntıları yalnızca küçük farklılıklarla açığa çıkarılmış olsaydı, Ay oluşumu bölümü oldukça farklı olabilirdi. Etki dolaysız olarak ve tam merkezden hedeflenmiş olsaydı, Theia'nın kütlesinin büyük bir bölümü yeryüzünün bir parçası olurdu. Büyük ihtimalle, Theia ve Dünya tek bir Ay'sız Dünya'da birleşeceğinden, bir uydumuz olmazdı. Ya da Theia Dünya'yı ıskalamış olsaydı, yörüngesi, belki Dünya'nın çevresini sonsuza dek terk edecek biçimde, içeriye, Venüs'e ya da dışarıya, Mars'a fırlatılacak kadar değiştirilmiş olabilirdi. Çarpma daha dolaylı olmuş olsaydı saçılan enkazın dağılımı Dünya'nın gece göğünü süsleyecek çok daha küçük sayısız uydu ortaya çıkarabilirdi.

Dinamik kozmik çevremizde, şans önemli bir rol oynar. Güneş Sistemi'mizin tarihi darbelerin ve çarpışmadan ucuz kurtulmaların bir tekrarıdır. Dinozorların öldürülmesine sebep olan asteroid, aynı zamanda hedefini şaşırmış ve *Tyrannosaurus* ve onun soyundan gelenlerin on milyonlarca yıl daha gelişmesinin önüne geçmiştir. Belki de büyük beyinli kuşlar zeki, uçan alet yapıcılara dönüşecekti. Belki de o uzatılan Mezozoik Dönem'in çelimsiz memelileri hiçbir zaman fazla bir anlam ifade etmeyecekti. Bir yerlerde küçücük bir çimdikle, Dünya farklı bir yol çizecekti.

Fakat evrenin bazı yönleri kaçınılmaz ve belirleyicidir. Çok sayıda proton ve elektronun ve bununla tutarlı oranlarda hidrojen ve helyumun üretimi, evrenimizle Büyük Darbe anından itibaren bağlantılandırılmıştı. Yıldızların oluşumu büyük miktarlarda hidrojen ve helyum üretiminin kaçınılmaz bir sonucuydu. Tüm diğer unsurların nükleer füzyon reaksiyonlarıyla ve süpernovalarla sentezlenmesi aynı şekilde hidrojen-yoğun yıldızların oluşumuyla önceden belirlenmişti. Dünya'ya benzer, Mars'a benzer, Jüpiter'e benzer her türden ilginç gezegenin ve yeni yeni uzak yıldızların yörüngesinde olduğu keşfedilen düzinelerce başka türün birikimi de mutlak biçimde tüm bu kimyasal unsurların senteziyle gerçekleşmiştir.

Böylelikle Theia-sonrası Dünya karmaşık bir soğuma ve öz oluşum dönemine girdi. Peki, bu yeni oluşmaya başlayan Dünya neye benziyordu? Jeologlar Dünya'nın ilk beş yüz milyon yılını, mutlak biçimde varlığını sürdürmüş olan cehennemi koşullar bağlamında Hadean Devir diye adlandırdı. Bilgiye dayalı yorumlarda, Dünya'nın Hadean Devri'nin muhteşem bir resmi çizilir: Kükürtlü volkanik gazlar, nehirlerce kor hâlinde lav ve asteroid ve kuyruklu yıldızların düzenli bombardımanı Dünya'nın yüzeyini durmaksızın bozmuştur. Bununla beraber yeryüzünün ilk birkaç milyon yılının herhangi bir ayrıntısını bilme zorunluluğumuz vardır çünkü somut kanıtlardan bütünüyle yoksunuzdur.

Dünya'nın kökenlerine ilişkin olarak elimizde Güneş Sistemi'nin (Güneş'in ve ona yerçekimiyle bağlı sayısız objenin) çok sayıda belgesi bulunur. On binlerce gök taşı, gezegenimsi yapıların

yaşının en yakın içsel görüntüsünü sunar. Ay'ın kökeninin ayrıntıları, Ay'daki her kaya ve toprakta bulunur. Fakat Dünya'nın ilk günlerinden hiçbir şey, en azından Dünya'nın kendisinde bilinen hiçbir şey kalmaz. Ne bir kaya parçası ne de bir mineral taneciği.

İlginç biçimde, bu türden kanıtlar, milyarlarca yıl önceki dev darbeler sırasında Dünya'nın ilksel yüzeyinden kopmuş ve sonrasında yeniden Dünya'ya ya da yakındaki Ay'ın yüzeyine düşmüş gök taşları biçiminde var olmayı sürdürebilir. Bazıları tüm bu süreçte gerçek anlamda değişmemiş olan bu türden örnekler, muhtemelen çok sayıda olup mutlak biçimde varlığını korumaktadır. Gerçekten de Dünya'nın ilk kalıntılarının arayışının, Ay'a geri dönmenin pek çok bilimsel gerekçesinden biri olduğu belirtilmiştir. Ay yüzeyinde titizlikle yürütülen jeolojik araştırmalar, başıboş Hadean taşlarının bulunmasını sağlayacak, dolayısıyla Dünya'nın erişilmez geçmişine ilişkin gerçekleri açığa çıkaracak kadar şanslı olmuş olabilir.

Fakat Dünya'nın ilk katılaşmış yüzeyinin bir parçasını tutmak oldukça iyi olabilirse de bütünüyle engellenmiş değiliz. Çünkü Dünya tekrar tekrar değişmiş olsa da kimya ve fizik kanunları için aynı şey söylenemez. Bu kimya ve fizik kanunları, her zaman olduğu gibi, bundan dört buçuk milyar yıl kadar önce de varlığını koruyordu fakat aslında daha fazla büyük darbe ya da gezegen boyutundaki diğer zorluklar yoktu.

Başat Kaçınılmazlık

Yeryüzünün ilk aşamadaki evrimi iç içe geçmiş iki kimyasal gerçekliğin bir sonucuydu: Kozmokimya (elementlerin oluşumu) ve petrokimya. (kayaların oluşumu) Önce kozmokimya ortaya çıktı ve daha ağır tüm elementler yıldızlarda oluştu: Her şey ilk sıradaki bir ve iki numaralı elementler olan hidrojen ve helyumun ötesindeki periyodik tablodaydı. Evrenimizde, bu kimyasal elementlerin pek çoğu baskın olmaya yazgılı olmuştur: Oksijen, silikon, alüminyum, magnezyum, kalsiyum ve demir, özellikle kayalık karasal gezegenlerdeki tüm diğer elementlerden çok daha baskın çıkar.

Bu altı element Dünya'nın kütlelerinin yüzde doksan sekizini oluşturur, Dünya'daki Ay'ın, Merkür'ün, Venüs'ün ve Mars'ın yüzde doksan sekizini oluşturdıkları gibi.

Bu "altı büyük" elementin her birinin anlatacak farklı bir kimyasal öyküsü vardır. Her biri, kendi tarzında, Dünya'nın Büyük Darbe'den sonra kaçınılmaz olarak dönüşeceği şeye dönüşmesinde yardımcı olmuştur. Temel konu kimyasal bağıdır. Atomların belirsiz elektron bulutları etkileşime geçtiğinde birbirine bağlandığını ve daha sabit düzenlemeler oluşturmak üzere sürüklendiğini hatırlayın. Bu türden bir değiş tokuşun işlevsel olması için, bazı atomların elektronlarını vermeleri, diğerlerininse bunları kabul etmeleri gerekmiştir.

Oksijen Dünya'nın başat elektron alıcısıdır. Her oksijen atomunun çekirdeğinde, sekiz negatif yüklü elektronun elektriksel dengesini kurduğu sekiz pozitif yüklü proton bulunur. Fakat oksijen büyülü on elektron sayısına erişmek için her zaman iki ekstra elektron aramaktadır. Bu bitimsiz, doyumsuz dürtü oksijeni doğadaki en reaktif, aşındırıcı gazlardan birine dönüştürür. Bu gerçekten de oldukça nahoş bir şeydir.

Pek çoğumuz oksijenin, öncelikle ve en çok, atmosferin önemli bir parçası (bizi canlı tutan yaklaşık yüzde yirmi birlik oran) olduğunu düşünürüz. Fakat atmosferdeki bu mutlu gelişme Dünya tarihinde görece yeni bir değişikliktir. Yeryüzünün en azından ilk iki milyar yılı boyunca, atmosfer oksijenden oldukça yoksundu. Bugün bile, Dünya'daki oksijenin neredeyse tamamı (yüzde 99,9999'u) kaya ve minerallerin içinde bulunur. Heybetli, yalçın bir dağa tırmandığınızda ya da rüzgârlı, kayalıklı bir yüzeyde yürüdüğünüzde, ayağınızın altındaki atomların büyük bir bölümü oksijendir. Kumlu bir sahilde yattığınızda, ağırlığınızı destekleyen atomların yaklaşık üçte ikisi oksijendir.

Oksijenin elektron alıcısı olarak bu kritik kimyasal rolü oynaması için, aynı zamanda elektronlarını verebilecek ya da paylaşabilecek pek çok atomun da olması gerekir. En verimli elektron sağlayıcı silikondur, silikon Dünya'nın kabuk ve örtüsündeki dört

atomdan yaklaşık birini karşılar. Silikonun çekirdeğinde dört pozitif yüklü proton bulunur, bunlar görünürde on dört negatif yüklü elektronla dengelenmiştir. Silikon genellikle büyüğü on elektron sayısını elde etmek ve pozitif elektrik yüklü bir silikon iyonuna dönüşmek için dört elektrondan vazgeçer. Dünya'nın kayalık kabuk ve örtüsünde, vazgeçilen bu dört elektron, negatif yüklü iyonlara dönüşen iki oksijen atomu tarafından, neredeyse her zaman yutulur. Sonuç olarak, güçlü silikon-oksijen bağları neredeyse her kayada, özellikle de kuvars ya da SiO_2 'de (silikon ve oksijen atomlarının bire iki karışımında) bulunur. Katı, mat kuvars tanecikleri uzun süre varlığını korur. Kıyılarda trilyonlarca sayıda birikirler ve bugüne dek sahil kumunun en sık görülen bileşeni olmuşlardır. Muhtemelen “Yeni Çağ” mağazalarında “güç kristalleri” olarak satılan güzel, keskin yüzlü, şeffaf kristal türleri de görmüşsünüzdür. Bu türden bir hazineyi elinizde tuttuğunuzda, elinizdekinin üçte ikisi oksijendir.

Bir arada silikat diye adlandırılan silikon-oksijen bağlı kristaller, bilinen bin üç yüzden fazla türleri (ve neredeyse her ay eklenen yenileriyle) yeryüzünün en sık görülen mineralleridir. Silikon-oksijen bağlantısının çok yönlülüğünden ötürü, atomsal yapıları ve özellikleri bağlamında oldukça büyük farklılık gösterirler; ister kuvars ve feldspatın hava koşullarına dayanıklı, sağlam yapısında ya da cevherli yeşil olivin ve lal taşının (sırayla Ağustos ve Ocak aylarının ikinci derecede değerli burç taşlarının) küme düzenlemelerinde, ister bazı bednam asbest türlerinin iğnemsiz zincir-silikat alışkanlıklarında ya da bir zamanlar pencere camının ucuz bir alternatifi olarak kullanılan mika gibi minerallerin ince düz tabakalarında olsun.

Silikondan daha az yoğunlukta olmalarına karşın, kalsiyum, magnezyum ve alüminyum elementlerinin tümünün, Dünya kabuğu ve örtüsünde en sık görülen silikat kayalarda temel yapısal rolleri vardır. Daha bol bulunan silikon kuzenleri gibi pozitif iyonlar olarak ara sıra yalnızca oksijenle bağ kurarlar ve çimenlerdeki kalsiyum oksit, nadir görülen bileşim magnezyum oksit ve (daha nadir görülen krom ve titanyumun eser miktarları alüminyum

oksidi dâhil edildiğinde) değerli yakut ya da safir taşları olarak gördüğümüz kalsiyum oksidi oluşturlar.

Bugüne dek içlerinden en çok yönlü olanı, altı büyük elementin altıncısı olan demirdir. Geri kalan beş elementin (oksijen, silikon, alüminyum, magnezyum ve kalsiyumun) her biri, tek bir baskın kimyasal kimlik olduğunu varsayar. Oksijen neredeyse her zaman iki elektronun alıcısı, silikon neredeyse her zaman dört elektronun sağlayıcısı, alüminyum üç elektronun sağlayıcısı ve magnezyum ve kalsiyum da iki elektronun sağlayıcısı olarak hareket eder. Fakat yirmi altıncı element olan demir, birbirinden oldukça farklı üç kimyasal rol oynar.

Dünya'nın katmanlı yapısı demirin çok yönlülüğünü vurgular. Dünya'nın oksijen-yoğun kabuk ve örtüsündeki yaklaşık on atomdan biri demirdir, öte yandan yeryüzünün metalik özünün yüzde doksandan büyük bölümü demirdir. Bu keskin zıtlık bu elementin yirmi altı elektronunun on sekizden, en yakındaki büyüklük sayıdan oldukça uzak olmasından, bunun da demiri kusursuz bir sağlayıcıya dönüştürdüğü gerçeğinden kaynaklanır. Demirin sekiz elektron vermesi hiçbir şekilde mümkün değildir (hiçbir atom bu kadar büyük bir miktarı kabul etmeyecektir) dolayısıyla alıcıların mevcut durumuyla yetinmesi gerekir.

Bazen demir tıpkı magnezyum gibi hareket eder ve bir + 2 iyonuna dönüşmek için iki elektrondan vazgeçer. Demir, bu çift değerlikli durumda, pek çok minerale ve diğer kimyasallara gözle görülür bir yeşilimsi ya da mavimsi renk kazandırır. Yontulmamış peridot taşının (demir içeren olivin) karakteristik yeşil rengi ve damarlarındaki oksijenden yoksun kanın mavimsi yeşil rengi, çift değerlikli demirin göstergeleridir. Bu görünümle, demir oksijene bire bir oranda bağlanır. Magnezyum ve demir atomlarının boyutu benzer olduğu için de bu elementler Dünya'nın kabuğundaki ve örtüsündeki ortak minerallerde sıklıkla birbirlerinin yerine geçer. Yeryüzünde, olivin, lal taşı, piroksen ve mikanın da aralarında olduğu en sık görülen minerallerden bazıları, yüzde yüz oranda magnezyumun olduğu renksiz olanlardan yüzde yüz

oranda çift değerlikli demir içeren koyu tonlu değişkenlere kadar, neredeyse her türden magnezyum-demir oranını gösteren değişkenlere sahiptir.

Ancak demir +2 durumuyla sınırlı değildir. Pek çok elektron alıcısının olduğu bir durumda, bir +3 iyonuna dönüşebilmek için üçüncü bir elektrondan kolaylıkla vazgeçer. Bu üç değerlikli demir formu, kendisini taşıyan maddeye karakteristik tuğla kırmızısı bir renk verir. Kırmızı pas, kırmızı topraklar, kırmızı tuğlalar ve oksijen deposu kırmızı kan, canlı tonlarını üç değerli demire borçludur. Yine +3 durumunu benimseyen alüminyum gibi, üç değerlikli demir de kan kırmızısı rengi için, $Fe_2 O_3$ (hematit denilen sıkça görülen bir mineral) oluşturmak için ikiye üçlük bir oranla oksijenle birleşir. Tıpkı magnezyumun sıklıkla demirin çift değerlikli formunun yerine geçmesi gibi alüminyum da genellikle demirin üç değerlikli değişkeninin yerine geçer. Lal taşı, amfibol ve mika mineralleri, düşünülebilecek her türden alüminyum-demir oranına sahiptir ve demir açısından zengin değişkenler yeşilden çok kırmızı renkte görülür.

Dolayısıyla +2 durumundan +3 durumuna, oldukça işlevsel olan gidip gelme durumuyla (bu önemli beceriye birkaç milyar yıl içinde, yaşamın ilk belirtileri görülmeye başladığında döneceğiz), çift değerlikli ve üç değerlikli görünümüleriyle demir, büyük altının diğer üyeleri gibi hareket eder. Fakat durun, demirin Dünya'da oynadığı bir kritik rol daha vardır: Kolaylıkla bir metal oluşturabilir.

Şimdiye dek bahsedilen kimyasal bağ türlerinin büyük bir bölümü, sonunda iyonları oluşturan bir elektron değiş tokuşunu içerir. Alüminyum, magnezyum, kalsiyum ve demir elektronlar verir; oksijen bunları geri alır. Sonuçta, bu bağlantılar iyonik bağlar diye adlandırılır. Ancak metaller oldukça farklı bir bağ kurma stratejisine sahiptir. Bir metalde, her atom pozitif olarak yüklenmek için bir ya da iki elektrondan vazgeçer. Fakat haklarını kaybeden bu elektronlar metalin içinde, tüm pozitif yükü atomları, melasların içindeki güdümlü küçük BB dizileri gibi bir arada tutan bir tür yapışkan, negatif yüklü denizde gezinir. Demir metal, bu türden

hareket alanı artan elektronları ortak olarak paylaşan geniş bir demir atomlar koleksiyonudur.

Bu ortaklaşa davranışın büyük sonuçları vardır. Öncelikle, paylaşılan bütün bu elektronlar çevrede gezinmekte özgürdür, dolayısıyla metaller kusursuz elektrik iletkenleridir (elektrik elektronların kontrollü akışından başka bir şey değildir). Buna karşılık oksijen ve magnezyum ya da alüminyumdan yapılan iyonik olarak bağlı materyallerde, her elektron bulunduğu yere elektriğin akışına olanak vermeyecek biçimde sıkıca yerleştirilmiştir. Metalik bağın bir diğer sonucu da bu tür materyallerin kırılmaktan çok bükülme eğiliminde oluşudur. Atomları çevreleyen elektron denizi, kolayca kırılan pek çok kaya ve mineralin yapısından oldukça farklı biçimde toplu gücünü kaybetmeden katlanıp bükülebilir.

Kavrayışlı okur bu demirin bu metal oluşturma oyununu sahnelerken yalnız olmadığını fark edecektir. Alüminyum metal kaplar, folyo ve ev elektrik tesisatı sıkça görülür; magnezyum metal alaşımları, yüksek teknolojili yarış arabalarının ve diğer oyuncakların başat unsurlarından biridir ve yarı metal silikon her elektronik aletin kalbinde yer alır. (Silikon Vadisi'ndeki gibi) Fakat metalik alüminyum, magnezyum ve silikon, kimyasal endüstrinin modern mucizeleridir. Bu inatçı elementleri oksijenden koparmak çok fazla enerji gerektirir ve metalik durumları neredeyse hiçbir zaman doğa içinde oluşmaz.

Demir oksijene daha az bağlıdır ve kimyasal bağ ortakları açısından daha kararsızdır. Silikon, alüminyum, magnezyum ya da kalsiyumdan farklı olarak diğer elektron alıcılarına, özellikle sülfüre bağlanmaktan son derece mutludur -demir sülfür parlak mineral piriti ya da "ahmak altını"dır. Bu diğer elementlerden farklı olarak, demir hemen gezegenlerin merkezine çöken ve kütleli özlerini oluşturan yoğun bir metal oluşturur.

Eriyik Dünya

Her biri patlayan yıldızların ve karasal gezegenlerin evriminin kaçınılmaz birer sonucu olan altı büyük element, aynı zamanda

yeryüzünde en çok görülen kayalardan da sorumludur. Farklı kimyasal davranışları, gezegenimizi bugün içinde yaşadığımız Dünya yönünde değiştirilemez bir dönüşüm sürecine sokar. Fakat kayaların oluşması mümkün olmadan önce, yeryüzünün soğuması gerekmiştir.

Bir kez daha Ay'ı oluşturan darbeyi izleyen şiddetli yılları hayal edin. Birkaç gün ya da hafta için, neyin Dünya'ya ve neyin Ay'a dönüşeceği hâlâ çözümlenme sürecindeydi. O ilk Theia-sonrası günlerinde, ne Dünya'nın ne de Ay'ın katı birer yüzeyi yoktu. Bu birleşen eş kürelerin her ikisi de yuvarlanan ve oldukça parlak kırmızı renkte, binlerce derecelik ısılardaki akkor hâlinde erimiş silikat yağmurun dövdüğü, kuşatıcı bir magma okyanusuyla sınırlıydı.

Hava Theia'nın kalıntılarından arındıkça, maden eritme ocağına benzer bir sıcak yeryüzünden uzayın soğuk boşluğuna yayıldı ve Dünya'nın dış kabuğunu değiştirilemez biçimde soğuttu. Böyleyken dahi, kozmik olaylar Dünya'nın yüzeyini bir süre daha eriyik hâlde tutabilmiştir. Öncelikle, büyük asteroidler gezegene çarpmayı sürdürüyordu. Her çarpışma daha fazla termal enerji ekliyor, darbe alanını aşırı derecede ısıtıyor ve sabit bir kabuk oluşumuna yönelik her türden girişimi bozuyordu. Yakınlardaki Ay'dan gelen yoğun yerçekimi kaynaklı akıntılar da Dünya'nın akışkan durumunu korumasına yardımcı oldu, çünkü beş saatte bir ekvatorial, çalkantılı bir magma çıkıntısı Dünya'nın çevresinde ilerliyor, her ince, katı kaplamanın düzenini çerçevelendiriyordu. Dünya'nın çok sayıdaki radyoaktif elementi (hem kısa ömürlü, hem de ısı üreten alüminyum ve tungsten izotopları ve uzun ömürlü radyoaktif uranyum, toryum ve potasyum izotopları) ısıyı daha da arttırmayı sürdürdü. Karbondioksit ve suyun bol miktarda bulunduğu buharların volkanik salınışıyla beslenen genç ve büyüyen bir atmosfer de bu etkileri bir "süper sera" durumunu tetikleyerek arttırmış olabilir.

Bilinmeyen, belki yüz yıl ya da yüz bin yıl kadar (jeolojik açıdan göz açıp kapayıncaya kadar geçen) bir süre boyunca, akışkanlık durumu devam etti. Fakat soğuma ve katılaşma önceden belirlenmişti. Termodinamiğin ikinci yasasında, bariz yeni enerji

girdilerinden yoksun olan objelerin soğuması gerektiği ve obje ne kadar sıcak olursa soğuma oranının o kadar hızlı olacağı ifade edilir.

Üç bilindik mekanizma bu ısı aktarımını kolaylaştırır. Öncelikle iletim vardır. Daha sıcak bir obje daha soğuk bir objeye dokunduğunda, ısı enerjisi sıcaktan soğuğa akmalıdır. Geçmişte Güneş'ten kavrulmuş kaldırımında yürümekten ayaklarınızın yanmasını ya da yanan bir ocağa dokunan elinizin su toplamasını deneyimlediyseniz acı verici ölçüde açık olan bu süreç, atomların sürekli hareket hâlinde olmasından kaynaklanır. Daha sıcak objelerin içindeki atomlar, daha şiddetli hareketler deneyimler. Daha yavaş hareket eden atomları olan daha soğuk bir obje, daha sıcak, daha fazla şiddetli atomu olan bir objeyle etkileşime geçtiğinde, bu şiddetli hareketin bir bölümü atomdan atoma çarpışmalarla aktarılır. Dokunduğunuz obje yeterince sıcaksa, hücreleri öldürerek ve bir yanığa yol açarak teninizdeki molekülleri bozabilir. İletim ısıyı bölgesel olarak bir objeden yakındaki başka bir objeye aktarmanın iyi bir yoludur. Sadece ısıyı hareket hâlindeki bir atomdan diğerine aktarmak çok uzun zaman alır.

Atom yığınlarının termal enerjinin yerini bütünüyle değiştirmesine olanak sağlayan ısı yayım, soğuma için daha iyi bir gezegensel seçimdir. Her su kaynatışınızda ısı yayımı deneyimlersiniz. Bir tavaya su koyun, ocağı yakın ve bekleyin. Süreç başlangıçta yavaştır çünkü sıcak tava soğuk suyla etkileşime geçer ve ısıyı ısı yayım yoluyla aktarır -tavanın içindeki metal atomlar her hareketle su moleküllerini iter. Fakat çok geçmeden başka bir mekanizma devreye girer. Dipteki ısınmış su yayılmaya ve üstteki daha soğuk, daha yoğun suya doğru yükselmeye, sıcaklığı toplu olarak yüzeye aktarmaya başlar. Aynı anda, daha soğuk, daha yoğun olan yüzey suları sıcak dibe doğru batır. Isı değiş tokuşu gitgide hızlanan biçimde ilerler ve siz bir kaynama noktasına erişene kadar su kolonları yükselir ve çöker. Sıcak suyun yukarıya, soğuk suyun aşağıya doğru iletim döngüsü yoluyla, geniş hacimlerdeki su, hızlı ve etkin bir dansla ısıyı sıvının içinde yayar.

Büyük ölçekli yeryüzünde, ısı yayımı tekrar tekrar görülür -bir yaz günü soğuyan açık deniz esintilerinde, Ekvator'dan kutuplara

sürüklenen büyük, okyanus akıntılarında, gök gürültülü fırtınaların çalkantılı, şimşekli başlangıçlarında, kaynayan kaplıcalar ve fişkıran gayzerlerde. Dolayısıyla, sıcak, basınçlı kayaların yumuşadığı ve milyonlarca yıl boyunca karamel gibi aktığı bölge, yeryüzünün iç bölgesidir. Yüzeyin yakınındaki daha soğuk, daha yoğun kayalar batarken daha sıcak, daha az yoğun kayalar yükselerek yerlerine geçer. Dünya tarihi boyunca ısı yayımı gezegensel soğumanın başat güdüleyicisi olmuştur.

Bir de radyasyon, ısı transferinin üçüncü mekanizması vardır. Her sıcak obje sıcağı daha serin çevrelerine, bir boşluktan saniyede 300.000 kilometre hızla geçen kızıl ötesi radyasyon biçiminde yayar. Her rahatladığınızda ve parlayan Güneş'in ışınlarını içinize çektiğinizde oldukça gözle görülür olan bu bilindik enerji formunun yapısı (ısı radyasyonunun biraz daha uzun dalga boyları olsa da) görünür ışık dalgalarına benzer. Belki de en bariz kızıl ötesi enerji kaynağı, uzay boşluğunda yaklaşık 8,3 dakikada seyahat eden kızıl ötesi radyasyonla yeryüzünü yıkayan Güneş'tir. Elektrikli bir oda ısıtıcısı, şöminenizde sıcacık bir ateş ve eski bir sıcak su radyatörü diğer bilindik örneklerdir. Daha sıcak olan her obje, ısıyı daha serin çevrelerine yayar. Bedeniniz bir istisna değildir. Bu yüzden kalabalık bir oditoryum oldukça rahatsız edici bir sıcaklığa ulaşabilir (her birey yüz vatlık bir ampul gibi ısı yayar) -bu insanların ve kızıl ötesi radyasyon yayan diğer hayvanların karanlıkta parıldamasına yol açacak bir gece görüş gözlüğü takılmasıyla kolaylıkla doğrulanabilecek bir gerçektir.

Isı aktarımının oranı, ister iletimle, ister ısı yayımıyla ya da radyasyonla olsun, daha sıcak ve daha soğuk objeler arasındaki ısı farkına bağlıdır. Isı farklılıkları fazlaysa iletim daha hızlı, ısı yayımı daha güçlü ve radyasyon çok daha yoğundur. Dünya sıcak bir gezegendir. Uzayın soğukunda Güneş'in çevresinde dolaşırken, her zaman boşluğa ısı yaymaktadır. Fakat kıpkırmızı Theia-sonrası Dünya, fazla ısı enerjisini uzayda, modern zamanlarda karşılığı olmayan bir oranda patlatmıştır. Bu fazla enerji uzayın kara boşluğunda gerçek anlamda parıldamıştır.

İlk Kayalar

Dünya'nın uzay karşısındaki olağanüstü ısı kaybı göz önünde bulundurulduğunda, kayalıklı bir kabuğun oluşumu kaçınılmazdı. Bir yerlerde, muhtemelen yeryüzünün gelgitsel açıdan daha az gerilimli kutuplarından birinin yakınlarında, eriyik yüzey ilk kristallerin oluşumu için yeterli ölçüde soğudu. Fakat soğuma ve kristalleşme basit bir olay olmaktan uzaktı. Pek çok sıradan maddenin soğuyan bir sıvının katı hâle geldiği iyi tanımlanmış bir ısısı (bilindik donma noktası) vardır. Su sıfır derecede, gümüşümsü cıva metali -39 derecede ve etanol (bildiğimiz alkol) de -117 derecede donar. Fakat magma farklıdır. Magmanın 1.370 derecenin üstündeki *donma noktası*, zıtların bir tür birleşimi gibi görünse de tek bir donma noktasının olmayışı merak uyandırıcıdır.

Gelin bundan 4,5 milyar yıl kadar önce, yeryüzünün ve onun ayının 5.540 derece dolaylarında, ışıyan bir silikat buhar atmosferini paylaştığı, Theia sonrası cehenneminin ilk dönemlerinden başlayalım. O cehennemi kaya gazı hemen soğudu, sonunda damlacıklar şeklinde yoğunlaştı ve önce 5.000, sonra 4.000 ve daha da sonra 3.000 derecenin altına düştükçe, yeni ikiz dünyaların üzerine magma şeklinde yağdı. Böylelikle ilk kristaller oluşmaya başladı.

Yeryüzünün ilk kayalarının bu türden hikâyeleri deneysel taşbilimcilerin, Dünya'nın derinliklerindeki koşulların benzerini oluşturmak için kayaları pişirmek ve sıkmak amacıyla yeni laboratuvar teknikleri geliştiren kadın ve erkeklerin bilimsel alanıdır. Kaya kökenlerini keşfetme arayışı iki teknik güçlük içerir. Öncelikle bin derecelik, evinizdeki herhangi bir fırın ya da ocaktan çok daha yüksek ısıları kontrol etmeniz gerekir. Bilim insanları bunu yapabilmek için, titizlikle aralıklı bırakılmış bobinlerin içine platin işler; uç noktada ısılar elde edebilmek için bu yoldan yüksek elektrik akımları iletirler. Daha da zorlayıcı olan, bu ısıların, örnekler atmosferin onlarca ya da yüzlerce bin katı ezme basıncına maruz kalırken uygulanmak zorunda oluşudur. Araştırmacılar bu titizlik isteyen görev için oldukça büyük su mengeneleri ve menene benzeri dev preslerden destek alır.

Bilimsel evim olan Carnegie Enstitüsü Jeofizik Laboratuvarı, yüz yıldan uzun bir süredir, yeryüzünün derin gerçeklerinin bu kahramanca arayışları için bir merkez oldu. Hastanedeki zamansız ölümünden önce, kısa bir süre için, deneysel taşbilimin öncülerinden biri ve bazalt taşının kökenleri konusunda dünya çapında öncü bir uzman olan Hatten S. Yoder, Jr. ile birlikte çalışma şansım oldu. Dayatmacı, dinamik, heyecanlı ve dikkatli olan Yoder, alanda gerçek anlamda yükselen bir figürdü. İkinci Dünya Savaşı sırasında deniz subayı olduğundan dev metal donanımlara oldukça aşinaydı. 1950'lerde, Jeofizik Laboratuvarı'na katıldı ve yalnızca yarım yüzyıllık kariyerini değil üzerinde durduğumuz toprağı kavrayışımızı da şekillendirecek yüksek basınçlı laboratuvarı inşa etmek için, denizcilikte kullanılan üretim fazlası tüfek namluları ve zırlı levha, düz boyanmış savaş gemisi grisi kullandı.

Yoder'ın aracının en önemli unsuru bir "bomba"ydı -bu otuz santimetre çapında, elli santimetre uzunluğunda, üç santimetrelilik bir deliğı olan oldukça büyük bir çelik silindirdi. Bombanın bir ucu, on iki bin atmosferlik sarsıcı bir gaz basıncı (yeryüzünün yüzeyinin kırk kilometre altında bulunan basıncı) oluşturabilen bir dizi gaz pompasına, kompresöre ve pekiştiriciye bağlıydı; bunu aygıtın, felaketle sonuçlanacak biçimde arızalanması durumunda, bir dinamit çubuğunun patlama gücüne eş değer bastırılmış bir enerjiyle yapıyordu. Bombanın diğer açık ucu, otuz santimetre uzunluğunda bir kaya örnekleri toplamını ve on beş santimetre çapında dev bir altıgen somunu alıyordu. Somunu doksan santimetre uzunluğunda, dokuz kiloluk bir İngiliz anahtarıyla sıkarak aygıtı mühürledik.

Hat Yoder'ın cihazının güzelliğı, altından küçük tüplere toz hâline getirilmiş kaya ve mineral örnekleri doldurabilmemizden, tüpleri silindir şeklinde bir ısıtıcıya koyabilmemizden ve bunların tamamını bombanın basınç hücresinde tutabilmemizden kaynaklanıyordu. Basıncı yükseltin, elektrikli ısıtıcıyı açın ve bomba bütün işi yapsın. Her deneyde altı küçük altın tüp kullanılıyor, her çalıştırma birkaç dakikayla birkaç gün arasında bir sürede tamamlanıyordu. Hat Yoder'ın önemli buluşu ideal olarak, kayaların

yeryüzünün kabuğunda ve üst mantosundaki gelişimini incelemek için uygundu.

Yoder'ın ve meslektaşlarının ortaya çıkardığı şey, altı büyük elementin bol miktarda bulunduğu parlak bir eriyiğin, yaklaşık 1.480 derecenin altında soğuduğundan, magnezyum silikat olivin kristalleri oluştururken tipik olarak katılaşmaya başlayacağıydı. Hem Dünya'da hem de Ay'da, o uzun zaman önceki soğuma döneminde, güzel küçük yeşil kristaller magmanın içinde mikroskopik tohumlar olarak büyümeye başladı ve havalı tüfek mermilerinin, bezelyelerin ve üzümlerin boyutuna erişti. Fakat olivin tipik olarak içinde büyüdüğü sıvıdan daha yoğundur, dolayısıyla kristaller gittikçe daha fazla büyüyerek, safa yakın kristallerden oluşan büyük, derin kütleler biriktirip, dünit denilen çarpıcı yeşil bir kaya oluşturdukça, bu ilk kristaller de gittikçe daha hızlı biçimde çökmeye başlamıştır. Bugün bu kaya yeryüzünde görece nadir olarak bulunur, yüzeyde yalnızca dağları oluşturan zemin kabarması ve erozyon aktivitelerinin özgün yoğun, derinde oluşan olivin kümülatlarını açığa çıkardığı özel durumlarda görülür.

Olivin kristallerinin sürekli batışı, sonunda, Dünya'nın ve Ay'ın içinde soğuyan magmaları değiştirmiştir. Geriye kalan sıcak eriyiklerin yapısı da değişmiştir; magnezyumdan gittikçe yoksun kaldıkça, buna bağlı olarak kalsiyum ve alüminyuma daha fazla odaklanır duruma gelmişlerdir. Ay'ın üzerinde, magma okyanusu soğumayı sürdürdükçe, ikinci bir mineral oluşmaya başlamıştır. Kalsiyum alüminyum silikattan oluşan bir feldspat olan anortit, olivinin yanında kristalleşmeye başlamış, mat bloklar oluşturmuştur. Olivinden farklı olarak, anortit ev sahibi sıvısından daha az yoğundur, dolayısıyla yüzme eğilimi gösterir. Ay'ın üzerinde, son derece büyük oranlarda anortit magma okyanusunun yüzeyine çıkmış ve eriyik yüzeyin 6,5 kilometre kadar üzerine yükselerek, yüzen geniş bir feldispat sıradağlar kabuğu oluşturmuştur. Hâlâ Ay'ın yansıtıcı gümüşü yüzünün yüzde altmış beşine hâkim olan bu beyazımsı gri kütleler "Ay Düzlükleri" diye adlandırılır. Doğrudan magma okyanusundan yükselen bu kütleler Ay üzerindeki bilinen en eski oluşumlardır. Apollo örnekleri, 3,9 milyar yılla,

Büyük Darbe'den kısa süre sonraki 4,5 milyar yıl arasındaki döneme ait bu özgün anortozitler için bir dizi antik çağ açığa çıkarır.

Daha nemli yapısı, daha derin magma okyanusları ve buna bağlı olarak daha büyük içsel ısı ve basınçlarıyla yeryüzünde, bir şekilde farklı bir senaryo açığa çıkmıştır. Dünya tarihinin ilk evrelerinde, yüzeye yakın, düşük basınçlı bazı çevrelerde muhtemelen küçük miktarda anortit kristalleşmiştir fakat bu oldukça küçük bir mineraldir. Bunun yerini, bağlı silikat minerallerin en sık görüleni olan magnezyumun yoğun olarak bulunduğu ve bol miktarda görülen piroksen almış ve yoğun kristal çamuru olivinle birleşmiştir. Dolayısıyla yeryüzünün ilk kayaları, peridotit denilen katı, yeşilimsi-siyah bir kayada, ağırlıklı olarak olivin ve piroksen içerir. Peridotit değişkenleri, yeryüzünün dışındaki seksen kilometre boyunca, muhtemelen 4,5 milyar yıl öncesinden daha uzun bir süre önce kristalleşmeye başlamış ve bu yüzlerce milyon yıl daha sürmüştür.

Erken bir dönemde bol miktarda görülmesine karşın, bugün peridotit de yeryüzünün yüzeyinde görece nadir olarak görülür. İnandırıcı bir senaryoya göre, peridotit yığınları sertleşip soğuyarak yeryüzünün ilk geçici katı yüzeyini oluşturmuştur. Fakat soğuyan peridotit, dünit önceli gibi içinde olduğu sıcak magma okyanusundan gözle görülür biçimde daha yoğundur. Dolayısıyla peridotit yüzey, daha fazla peridotit oluşturacak biçimde soğuyan daha fazla magmanın yerini almak için yarılmış, bükülmüş ve yeniden kabuğuna çökmüştür. Yüzlerce milyon yıllık bir zaman dilimi içinde, kabuğun kendisi yavaş yavaş katılaşmış, yeryüzünün dışındaki seksen kilometreye uzayan bir tür peridotit taşıma bandı gibi işlev görmüştür. Yoğun katı peridotitin magmaya oranı üst kabuk büyük oranda katı olivin-piroksen kayaya dönüşene dek artmıştır.

Temel Gerçekler

Kabuğun daha derinlerinde, yüzeyin seksen ila üç yüz yirmi kilometre kadar altında, soğuma ve kristalleşme süreci daha ağır olsa da benzer bir şekilde ilerlemiş olmalıdır. Sürecin ayrıntıları

belirsizliğini korur -yüksek basınçlı, yüksek ısılı araçları kullanan bir sonraki nesil, karmaşıklıkları çözümleyecek duruma gelmelidir- fakat kristallerin, batarak ve yüzerek eriyiklerden ayrılması, daha yakındaki yüzey çevresinde olduğu gibi muhtemelen önemli bir rol oynamıştır.

Bu gizli, derin alanlara ilişkin bildiklerimizin büyük bir bölümü, sismoloji biliminden, hızla yeryüzünün derinliklerine inen ses dalgaları üzerinde yapılan çalışmadan kaynaklanır. Dünya sürekli bir zil gibi çalmaktadır: çarpışan akıntılar, gürleyen kamyonlar, büyüklü küçüklü depremler yeryüzünü sarsmak ve sismik dalgalar yaymak üzere bir araya gelir. Dik duvarlı bir kanyondaki ses dalgaları gibi, sismik dalgalar da bir yüzeye çarptığında yankılanır. Sismik dalgalar, yeryüzünün içinin karmaşık biçimde katmanlı bir yer olduğunu açığa çıkarır.

En temel anatomik düzeyde, Dünya üç misli katmanlıdır -yüzeyde ince, daha az yoğun bir kabuğu, ortada kalın, daha yüksek yoğunlukta bir mantosu ve merkezde daha kalın, gerçekten yoğun bir metalik çekirdeği vardır. Bu üç alanın her biri daha fazla tabakalama içerir. Örneğin manto üç alt tabakaya bölünmüştür -üst manto, geçiş bölgesi ve alt manto. Peridotitin hâkim olduğu üst manto muhtemelen 400 kilometre kadar derine iner, bu noktada derinlik basıncı olivinin içindeki atomları *wadsleyit*⁵ denilen daha yoğun bir silikat kristal formu içine dolmaya zorlar; bu mantonun geçiş bölgesinin baskın mineralidir. 240 kilometre aşağıda bulunan alt manto, magnezyum silikatların daha da yoğun bir topluluğunu içerir. Alt mantodaki basınç öyle yoğundur ki (yüzey basıncının yüzbinlerce katı) silikon-oksijen bağları perovskit denilen atomların daha da yoğun, etkin bir istifleme düzenini uygular.

Sismik çalışmalar, mineralojik açıdan farklı olan bu manto katmanlarından her birinin yapısını ve boyutunu belgeler ve genel olarak birinden diğerine geçişler tertipli ve düzenlidir. Geçişlerin net derinlikleri farklı yerlerde on beş ila otuz kilometre arasında hafif farklılıklar gösterir (örneğin okyanuslara karşı kıtaların altında)

5 Olivin mineralinin yüksek basınç altında kalmasıyla oluşan kristal form.

fakat her sınır görece düzgün ve iyi huylu görünür. Buna karşılık, sismoloji çekirdek-manto sınırının, temiz manto-manto geçişlerinden oldukça farklı, özellikle karmaşık bir bölge olduğunu ortaya koyacak cazip kanıtlar sunar. İlk yaklaşıma göre, çekirdek-manto sınırı, beklenen güçlü yankıyı üretir. Gerçekten de silikat manto ve metal çekirdek arasındaki yoğunluk karşıtlığı, yeryüzünün derinlerinden yansıtılan en güçlü sismik sinyali üreterek su ve hava arasındaki kadar keskin bir fiziksel sınır yaratacak ölçüde uç noktadadır. Yüz yıldan uzun bir süre önce, bu ayrım, yeryüzünün derinlerine ilişkin sismologların keşfettiği ilk gizli özelliklerden biriydi.

Kusursuz ölçüde düzgün ve düzenli bir sınır, keskin, odaklı bir sismik yansıma ürettiyordu -bu, bir sismometre üzerinde farklı bir uç olarak kaydedilebilecek yankılanan bir tepkiydi. Fakat çekirdek-manto sınırından yansıyan sismik sinyaller sıklıkla karmaşık, lekelenmiş, bozulmuştur. Aşağıda, düzensiz enkaz yığınları ya da kümeleri gibi ek bir yapı bulunur. Her zaman en cazip terminolojiyi uygulamakla tanınmayan jeofizikçiler, bu topaklı kaotik bölgeyi D" (D iki üssü) katmanı diye adlandırır. (*Kahverengi cüce, kırmızı dev ve kara delik* gibi hayali kavramları birleştiren astrofizikçiler bilimsel isim oyununda çok daha başarılıdır.)

Bu derin D" özelliğinin karmaşıklığı kısmen çekirdeğin homojen demir metal ve mantının çeşitli oksijen- yoğun mineralleri arasındaki keskin yoğunluk karşıtlığının sonucudur. Tüm manto mineralleri yoğun çekirdek üzerinde su üzerindeki mantarlar gibi yüzer fakat bu farklı mineraller yoğunlukları açısından büyük farklılık gösterebilir. İlkel magma okyanusunda, bazı silikatlar batmış, bazılarıysa yüzmüştür. Sonuç olarak, kristalleşen ilk büyük katı parçalar, mantının içinde en derinlere çökmüş, metal çekirdek üzerinde bir sal gibi yüzmüştür. Bazı sismologlar, kaotik biçimde sismik sinyallerin yönünü değiştirdikleri çekirdek-manto sınırı üzerinde yer alan düzensiz yoğun mineral yığınlarıyla dört yüz seksen kilometre yüksekliğinde "dağlar" hayal eder.

Şaşırtıcı biçimde, aynı zamanda muhtemelen alüminyum ve kalsiyum elementleri açısından zengin olan, yanı sıra yeryüzünün dış katmanlarının depolarında eksik görünen bir "uyumsuz

elementler” yığını olan büyük çekirdek-manto sınır birikintileri ve sıra dışı ölçüde yoğun silikat sıvı havuzları olabilir. Emin olmamızın kolay bir yolu yok, fakat sismologlar, sismik dalgaların yakındaki kayalardan yaklaşık yüzde on oranında daha yavaş hareket ettiği çekirdek-manto sınırının hemen üzerindeki D” katmanında, derin, sınırlandırılmış “oldukça düşük hız alanları”na işaret eder. Ağır sismik dalgalar sıklıkla sıvının bir göstergesidir. Bu türden derin sıvı gölleri ve göletleri aynı zamanda şu üzerinde durulan kayıp element sorununa toplu bir çözüm getirebilir: Sadece tüm uyumsuz elementleri, sonsuza dek mineralojik çöpün o gizemli, heterojen bölgesinde tutuldukları erişilmez D” katmanına yerleştirin.

Peki ya çekirdeğin kendisi? Yeryüzünün çok genç olduğu dönemde, 3.200 kilometreden fazla çapı olan yoğun, demir açısından zengin çekirdek, bütünüyle oluşmuştu ve muhtemelen (iç çekirdeğin 1.200 kilometre çapında büyüyen bir katı demir kristaller topu görünümünde olduğu günümüzden farklı olarak) bütünüyle eriyik hâldeydi. Basınç modern atmosferimizin bir milyon katının üzerine çıkarken, bu keskin çekirdek mantonun ara hattındaki sıcaklıklar 5.500 dereceyi aşmış olabilir.

Sıcak çekirdek başından itibaren helezonlaşarak dönen sıvı metal akıntıların dinamik bir alanıydı ve bugün de öyledir. Bu akıntıların önemli sonuçlarından biri yeryüzünün manyetik alanının (dev bir elektromıknatısa benzeyen manyetosferin) erken dönemdeki oluşumuydu. Manyetik alanlar elektrik yüklü parçacıkların yönlerini çizer, dolayısıyla yeryüzünün manyetosferi, yoğun Güneş rüzgârı ve kozmik ışın bombardımanına karşı, bir tür görünmez yön değiştirici kalkan sağlar -bu muhtemelen yaşamın kökenleri ve devamı için ön koşul niteliğinde bir bariyerdir.

Çekirdek aynı zamanda mantonun içindeki ısı yayımını yönetmeye yardımcı olan önemli bir ısı enerjisi kaynağıdır. Bugün bile çekirdek-manto sınırından yumuşak, plastik kaya dumanları, Hawaii ve Yellowstone gibi volkanik sıcak noktalarda yaklaşık üç bin iki yüz kilometre yükselir. Dikkat çekecek biçimde, yüzeydeki bu dumanların sabit yerleri derin topoğrafyayla dikte edilebilir. D” katmanının dört yüz seksen kilometre yüksekliğinde dağları

sıcak özün üzerindeki termal örtüler olma işlevi görebilir, dolayısıyla sıcak noktaların kökeninin o masalsı, gizli dağlar arasındaki en derin, ısı yayan vadilerde olması mümkündür.

Bazalt

Mineral evrim öyküsü temelde kaya türlerinin önceden belirlenmiş bir düzen içinde birbirini izlemesine dayanır; her mineral oluşum evresi mantıklı biçimde bir önceki evreyi izler. Yeryüzünün ilk peridotit kabuğu, ilkel magma denizinden doğan kritik fakat geçici bir gençlik evresiydi. Nihayetinde soğuduğunda ve katılaştığında, yüzeyin yakınlarında herhangi bir yerde kalmak için fazla yoğun olduğu ortaya çıktı, dolayısıyla yeniden yeryüzünün derinliklerine gömüldü. Daha az yoğun olan bir başka kayanın yerküreyi kuşatması gerekiyordu. Bu kaya bazalttı.

Siyah bazalt her karasal gezegenin yüzeye yakın kayalarına hâkimdir. Merkür'ün asteroid izli dış bölgesi büyük oranda bazalttır. Venüs'ün yanık, dağlarla kaplı yüzeyi ve Mars'ın ayrıışmış kırmızı yüzeyi de öyle. Ay'ın, daha soluk gri anortozit dağlık arazilerle oldukça canlı bir zıtlık oluşturan koyu lekeli karanlık bölgeleri (denizleri) uçsuz bucaksız siyah bazalt göllerinin katılmış kalıntılarıdır. Yeryüzünde, tüm okyanus diplerinin de dâhil olduğu yüzeyin yüzde yetmişi, bazalt kabuğun altındadır.

Bazaltın çok çeşitli türleri vardır fakat iki temel silikat mineral bu türlerin tümüne hâkimdir. Temel minerallerden biri plajiyoklaz feldispattır, bu mineral karasal gezegenlerde ve aylarda bugüne dek görülen en önemli alüminyum içeren mineral ve yeryüzünün en sık görülen kabuk mineralidir. MIT profesörüm Dave Wones, bir keresinde bana gizemli bir kaya gösterilirse ve bu kayanın mineralojisi konusunda sınava tabi tutulursam “plajiyoklaz” demem gerektiğini, bu cevapla yüzde doksan haklı olacağımı söylemişti. Bazaltın ikinci önemli mineralojik içeriği piroksendir, bu peridotitte de bulunan ortak bir zincir silikattır. Piroksen altı büyük elementin tümünü (ve daha az yaygın olan pek çok minerali de) bünyesinde toplayabilen bir avuç yaygın minerale biridir.

Bazaltın iki temel mineral içeriği olan plajiyoklaz ve piroksenin kökenlerini anlayabilmek için kayaların tuhaf donma ve erime alışkanlıklarını değerlendirin. Bundan dört buçuk milyar yıl kadar önce, yeryüzünün magma okyanusu soğurken önce olivin, daha sonra biraz anortit ve son olarak çokça piroksen oluştu. Sonuçta ortaya çıkan magnezyum silikat kaya, üst mantonun büyük bir bölümünü oluşturan peridotitti. Peridotit kütleleri oluşur ve çökerken yeniden ısınır ve kısmen yeniden erirler.

Erimeye ilişkin günlük deneyimlerimiz, katıdan sıvıya geçişin belirli bir ısıda gerçekleştiğini ortaya koyar. Su buzu 32 derecede, ev mumlarının büyük bölümü yaklaşık 130 derecede ve yoğun metal kurşun 327 derecede erir. Fakat kayanın erimesi o kadar basit değildir; kayaların büyük bölümü bütünüyle tek bir derecede erimez. Peridotiti yaklaşık 1.100 dereceye kadar ısıtacak olursanız, ilk erime görülecektir. (Peridotitte uçucu su ve karbondioksit bol miktarda bulunuyorsa daha yakın zamanda ortaya çıkacaktır.) Bu ilk mikroskobik damlacıkların kompozisyonu peridotit kaya kütesinden dramatik biçimde farklılık gösterir. İlk erimede çok daha fazla kalsiyum ve alüminyum, biraz daha fazla demir ve silikon ve çok daha az magnezyum bulunur. Bu ilk sıvı aynı zamanda peridotit taşıyıcısından çok daha az yoğundur. Sonuç olarak mantoda yüzde beş oranındaki bir erime bile, mineral taneciği sınırlarında toplanan, yarık ve çukurlarda birleşen ve yüzeye yükselen oldukça fazla magma oluşturur -bu nihayetinde bazalta dönüşecek olan magmadır. Milyarlarca yıllık Dünya tarihi boyunca, peridotitteki kısmi erime, yüzlerce milyon kilometreküp bazalt magma oluşturmuştur.

Eriyik bazalt gezegen yüzeylerine birbirini tamamlayan iki biçimde yükselir. Daha çarpıcı olan Hawaii ve İzlanda'daki gibi volkanik patlamalar yoluyla gelen, ateşten magma kaynakları ve nehre benzer akışları olanlardır. Bu türden dramatik püskürmeler, 1,6 kilometreden daha derinde, yüksek basınç altında silikat sıvı içinde kilitli kalan fakat patlayarak yüzey yakınındaki gaza dönüşen su ve buharlaşabilen diğer maddelerin bir sonucudur. Bu türden volkanik patlamalar, stratosfere kül ve zehirli gazlar boşaltabilir ve

araba boyutunda volkanik “bombaları,” çevredeki kırsal bölgeleri ezecek biçimde bir kilometre dışarıya savurabilir.

Bu bazalt lav ve kül püskürmeleri, katman katman kilometrelerce uzunlukta dağlar oluşturabilir ve binlerce kilometrekareyi siyah kayalarla kaplayabilir. Bu türden bir bazalt lav akışı ve kül, oldukça ince tanelidir ve bol miktarda cam içerir; bu, sıvının kristallerin oluşumuna zaman tanımayacak kadar hızlı biçimde soğumasının sonucudur. Sonuç siyah, niteliksiz, katılaşmış bir lav kabuğudur. Ancak peridotit otuz iki kilometreden az görece sığ derinliklerde kısmen eridiğinde görülen diğer farklı olivin bazaltları, erime katılaşmasının ilk evresinde yer altında oluşan birkaç parlak olivin kristali içerir. Yeşil kristaller, normalde düz siyah renkte olan kayayı süsler.

Magmanın yüzeye çıkması çok büyük bir patlayıcı güç gerektirir, dolayısıyla bazalt magmasının önemli bir bölümü hiçbir zaman yüzeye çıkamaz. Bu oldukça kızgın sıvılar daha çok yer altının derinliklerinde kalır, burada daha yavaş biçimde soğur ve diyabaz ya da gabro denilen kayaların içinde üç santimetre uzunluğunda, çark biçiminde feldispat ve piroksen kristalleri oluşturur. Bazen magma, düzgün yüzeyli kanallar oluşturmak amacıyla yer altındaki kayaların içinde bulunan dikeye yakın çatlaklara yerleşir. Ev sahibi kaya yumuşaksa ve milyonlarca yıl sonra aşınıyorsa sonuç olağan dışı biçimde arkeolojik bir alan gibi görünebilen uzun, düz bir diyabaz duvar olabilir. Öte yandan, magma düz duran tortul kaya katmanları arasına yerleşirse kalın, örtüye benzer bir pervaz oluşturabilir. Hudson Nehri’nin üzerinde, nehrin batı kıyısında, New York’un hemen üstünde belirgin biçimde görülen kayalık uçurumlar, New Jersey’nin kuzeyinde ve New York’un güneyinde paralel dağlık arazileri (ve en pahalı gayrimenkullerden bazılarını) oluşturacak biçimde hafifçe batıya eğilen bir dizi bazalt katmanının sonucudur. Diğer zamanlarda sıvı, yer altında kilometrelerce oluşabilen ve kilometrelerce uzanan düzensiz magma haznelerinde durur ve soğur. Fakat nihai geometrileri ne olursa olsun, diyabaz ve gabro gerçekten tam olarak bazalt gibidir.

Bazalt kabuğun kaçınılmaz oluşumuyla birlikte, Dünya ilk kez yüzebilen güçlü, katı bir yüzeyi deneyimledi. Kabuktan önce, magma ve peridotit gezegenin yüzeyini tek başına tanımlarken, hiçbir topoğrafik özellik uzun süre ortalamanın üzerinde belirgin bir yüksekliğe çıkamıyordu. Oldukça kızgın olan peridotit parçaları, bir dağı destekleyecek güce sahip olmanın yakınından bile geçmez. Fakat görece düşük yoğunluktaki katı bazalt için durum farklıdır. Bazaltın ortalama yoğunluğu, peridotitin ortalama yoğunluğuna kıyasla yüzde ondan daha düşüktür. Bu, on altı kilometre kalınlığında yüzen bir bazalt kütesinin, magma okyanusunun 1,6 kilometreden fazla üzerine çıkacağı anlamına gelir. Hızla biriken volkan konileri daha da yükseğe, muhtemelen ortalamanın üç kilometreden fazla yüksekine çıkabilir. Sonuç olarak, yeryüzünün lekelenmiş yüzeyi gerçek bir karakter geliştirmeye başlamıştır.

Düşman Dünya

Uzaydan (örneğin genç Ay'ın güvenli mesafesinden) bakıldığında, Dünya'nın bazalt maskesi, kırmızı kavisli çatlaklar ve akan hudutsuz volkanların yüzeyi kırdığı lokal parlak noktalarla simsiyah görünmüştür. Kirli beyaz, kül yüklü buhar püskürtüleri, buharlaşabilen maddelerin en fazla olduğu volkan konilerinden bazılarını ve yerkürenin yakındaki bölgelerini gizlemiştir.

Kendinizi, 4,4 milyar yıldan daha uzak bir geçmişte, o Hadean Dünya'sının oluşmaya başlayan siyah yüzeyinde hayal edin. Bu zorlu, yabancı bölgede uzun süre hayatta kalamazdınız. Meteorlar durmaksızın yüzeyi bombalar, kolayca kırılan ince siyah kabuğu yarar ve düzlüklere parçalanmış kayalar ve magma kütleleri yağdırır. Sayısız volkan konisi yükselerek, kademeli biçimde binlerce kilometre yükseğe çıkar, dev magma kaynakları bir gün okyanusları ve atmosferi oluşturacak kadar soğuyacak olan buhar ve diğer uçucu maddelerin patlayıcı salınımıyla güçlendirilir. Yaşamı destekleyen oksijenin hiçbir izi bulunmaz. Bu acımasız genç dünyada, burun delikleriniz pis kokulu kükürt bileşimlerinin saldırısına uğrayacak, cildiniz yoğun buhardan haşlanacak, gözleriniz

zehirli sıcak gazlardan yanacaktır. Bu türden düşman bir dünyada, dayanılmaz ölüm ıstırapınız kısa süreli olacaktır.

Geri çekilen Ay, kabuğun biçimlendirilmesinde önemli bir rol oynamayı sürdürmüştür. Yerküreyi kaplayan kaya ve magma akıntıları, Theia'nın yok oluşunu izleyen ilk yüzyıllara göre daha az aşırılıkta olsa da yüzeyi tekrar tekrar çatlatıp bükmüş, oldukça sıcak olan kayalıklı yüzeylere sızan ve katı yüzeyin oluşumunu engelleyen yarıklar açmıştır. Ayın rahatsız edici yakınlığı, yeryüzünün delice hızlı dönüşünü de sürekli kılar -beş saatlik günler sürmekte, buna, bugünün hava durumu kanallarında abartılan her şeyden çok daha şiddetli mega fırtınalar ve ultra kasırgalar eşlik etmektedir.

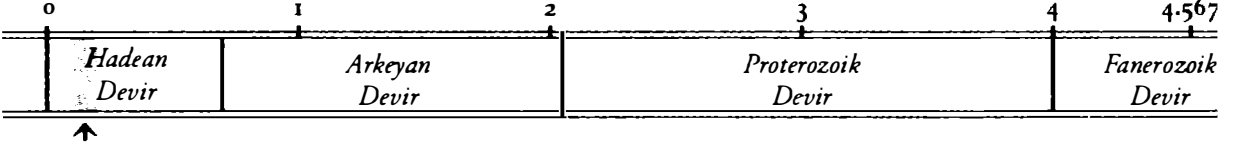
Fakat o korkunç yüzeyin altında, yeryüzünün canlı bir dünyaya doğru önüne geçilemez evrimi başlar. İyi karışmış, erimiş iç yüzey, farklı kompozisyonlarda hacimlere ayrılır -bu, kıtaları ve derin deniz kabuğunu, atmosferleri ve okyanusları, bitki ve hayvanları oluşturacak olan maddedir. Isınma, soğuma ve kristalleşme, kristallerin alçalma ve yüzme yoluyla ayrılışı, peridotit birikmesi, kısmi erime - bu süreçler yeryüzünü 4,5 milyar yıl kadar önce, çocukluk çağında biçimlendirmiş ve bugün dahi varlıklarını korumaktadır.

Yeryüzünün geniş iç ısı rezervuarı, bu bölümün temel konusu, evimizi biçimlendirmedeki baskın, dönüştürücü rolünü oynamayı sürdürmektedir. Bugün, bu derin, sıcak alanın en açık göstergeleri kızgın magma kaynakları ve ateş gibi erimiş kaya nehirleriyle aralıklı volkanlardır. Püsküren gayzerler ve kükürtlü kaplıcalar da cehennemi bir gizli yer altı bölgesine işaret eder. Yeryüzünün 4.567 milyar yıllık tarihi boyunca, sıcak karşı konulmaz biçimde akkor merkezden çatlamış kabuğa, dolayısıyla uzayın soğuğuna çıktıkça, yüzey oldukça ağır bir baskı altında kalmıştır. Mantonun türbülanslı ısı yayımıyla örselenen ve Ay'ın sürekli çekiminin baskısı altında kalan kabuk eğilip bükülür, çatlar ve burkulur. Kıtalar yerkürede sürekli olarak yer değiştirir, tektonik plakaların ısıya dayalı sürekli dansı sırasında parçalara ayrılır, çarpışır ve birbirini sıyrarak geçer. Yaşamlarımızın her gününde, yeryüzünün iç ısı

üzerinde yaşadığımız kayaları yeniden işler, içtiğimiz suyu dönüştürür ve soluduğumuz havayı değiştirir.

Yeryüzü, sıcaktan ötürü, kısa süreliğine, kalın bir bazalt maskeyle cilalanmış, siyah bir Dünya olmaya yazgılıdır. Fakat bu kısa gençlik evresi uzun sürememiştir. Volkandan doğan yeni bir parlak mavi katman, yeryüzünü sarmak üzeredir.

DÜNYA'NIN YAŞI (milyarlarca yıl)



Dördüncü Bölüm

Mavi Dünya

Okyanusların Oluşumu

Dünya'nın Yaşı: 100 ila 200 milyon yıl arası

Dünya'nın emekleme çağı, yaklaşık ilk yarım milyar yılı, gizemlerle doludur. Kayalar ve mineraller yeryüzümüzün hikâye edilmiş tarihinin büyük bölümü için somut kanıtlar sunar fakat pek az kaya ya da mineral o en eski Hadean Devri'nden sağ çıkar. Dolayısıyla, yeryüzünün ilk soğumasına ve siyah yüzeyinin sonraki dönemde sulanmasına ilişkin her türden anlatı, deney, model ve hesaplamalar sonucunda oluşan tahminler üzerine kurulmalıdır. Bu durumda dahi, her zaman bazı belirsizlikler olacaktır.

Bu kötü bir şey değildir. Laboratuvardaki her günü yeni ve heyecan verici kılan şey “bilmediğimizi bildiğimiz şey”in zenginliği ve her gün bizi gerçeğe biraz daha yaklaştıran küçük bir ipucu keşfetme ihtimalimizdir. Daha da cazip olan, doğal Dünya'nın “bilmediğimizi bilmediğimiz” yönlerini keşfetme umududur -bunlar gizemin kapsamını arttıran keşiflerdir.⁶ Soru sormanın bu yeni biçimleri -örneğin basit biçimde “Kimyasal ve fiziksel özellikleri

6 Sıklıkla Donald Rumsfeld'in 2002 konuşmalarına atfedilmelerine karşın, bu alıntılar ilk olarak yıllarca önce, Maxine Singer'la 1997 yılında birlikte çıkardığımız *Why Aren't Black Holes Black?* Kitabının önsözünde yer almıştır.

nelerdir?” den çok “Mineraller nasıl gelişti?” sorusunu sormak, dönüm noktalarına çıkan yolu açar.

Bilmediğimiz şeylerin envanterini yapmak önemlidir. Tüm kanıtlar Ay'ın epik bir darbeyele oluştuğunu ortaya koyar fakat ne çarpışmanın tam olarak ne zaman gerçekleştiğinden ne de Theia'nın son yörüngesinin ince ayrıntılarının neler olduğundan tam olarak emin olamayız. Bu muazzam çarpışmanın ardından, yeryüzünün işkence edilen magma okyanusu üzerine şiddetli, parlak bir silikat yağmuru yağdığını hayal edebiliriz fakat bu türden aşırı ısınmış bir Dünya'nın soğuma süresi ve oranı, başarısız biçimde zorlamadır ve gelecekteki onlarca yıl boyunca pek çok tartışmanın konusunu oluşturacaktır. Yeni oluşan Ay'ın yakınlık ve gerileme oranı, yeryüzünün ilk evresinin dinamiklerinin ve evriminin anlaşılmasında kritik önemde olsa da eşit ölçüde belirsizdir. Benzer şekilde, hiç kimse ne okyanusların ilk kez ne zaman oluştuğunu ne de tam olarak neye benzediklerini bilmez. Fakat oluşmuşlardır ve aşağıdaki öykü elimizdeki en iyi kanıtlar üzerine kuruludur, bu yüzden de şu an için elimizdeki en iyi alternatiftirler.

Siyah Dünya uzun süre siyah olarak kalamadı. Küresel çaptaki volkanik faaliyetler, sıcak nitrojeni, karbondioksiti, zehirli sülfür bileşimlerini ve su buharını günde milyarlarca ton oranında kalınlaşan atmosfere püskürttü. Bu uçucu elementler ve bileşimler (geçmişteki nebulanın çeşitli buzlarını oluşturan moleküllerin aynıları, şu anda solumakta olduğunuz ve vücudunuzun girift dokularını oluşturan atomların aynıları) hızla evrim geçiren yeryüzünde pek çok rol oynamıştır. Sıcak su kaya magmalarıyla karıştığında erime derecelerini düşürdü ve onları yüzeye doğru yükselen aşırı ısıtılmış bir çorbaya dönüştürdü. Yüzeye yakın bir noktada, bu magmatik çorbanın içinde çözülen gazlar, büyük patlamalarla sıvıdan şiddetli biçimde genişleyen gaza dönüştü, tıpkı sallanan bir sodanın içine hapsediği kutuyu patlatarak çıkmanın bir yolunu bulacak olması gibi. Suyun yoğun olduğu sıvılar aynı zamanda nadir görülen, sonunda yeryüzünün farklılaşan kabuğunun büyük cevher kütlelerine dönüşecek olan elementleri (berilyum, uranyum, lityum, selenyum, altın ve çok daha fazlasını) eritmiş

ve yoğunlaştırmıştır. Kaotik yüzeyde, uğuldayan nehirler ve çarpan dalgalar, kaya erozyonunun, yeryüzünün ilk kumlu sahillerinin ve kalınlaşan kıyıya yakın tortu birikintilerinin temel unsurlarına dönüşmüştür. Kısaca, su, yeryüzünün katı yüzeyinin temel mimarı olmuştur.

Okyanuslara ve atmosfere herhangi bir odaklanma, bir anlamda insan merkezli bir bakış açısını yansıtır çünkü bu sıvı kısımlar bir bütün olarak gezegenin önemsiz bileşenleridir. Okyanuslar bugün yeryüzünün toplam kütesinin yalnızca yaklaşık yüzde 0,02'lik bir oranını temsil eder, öte yandan atmosfer oylumunun milyonda bir parçasından fazlasını oluşturmaz. Ancak okyanusların ve atmosferin, yeryüzüne, bugün olduğu özgün Dünya hâline gelmesinde orantısız ölçüde büyük etkileri olmuş ve hâlâ da olmaktadır.

Beş temel etken (nitrojen, karbon, sülfür, hidrojen ve oksijen) yeryüzünün hareketli, gazlı bileşenleri olarak başat rollere sahiptir. Tüm bu içerikler büyük yıldızlarda bol miktarda üretilir, tümü süpernova patlamalarda geniş bir alana yayılır ve tümü 4,56 milyar yıl kadar önce, en ilkel karbon yönünden zengin kondrit gök taşlarında yoğunlaşmıştır.

Kondrit gök taşlarının ortalama kompozisyonu, pek çok açıdan yeryüzünün bugünkü durumuyla örtüşür. Üçüncü bölümde tartışılan altı büyük element (oksijen, silikon, alüminyum, magnezyum, kalsiyum ve demir), daha az bilinen sayısız element gibi, oranları açısından gözle görülür biçimde benzerdir. Fakat bu büyüleyici antik objeler üzerinde yapılan gelişigüzel bir çalışma bile, yeryüzünün özgün uçucu madde envanterinin büyük bölümünün bugünün gezegeninde bulunmadığını ortaya koyar. En ilkel kondritlerde, ortalama yüzde üçten fazla karbon bulunur fakat bugün yeryüzünde bilinen tüm karbon rezervuarları, yüzde 0,1'den daha az bir oranı oluşturur. Benzer şekilde, kondritlerin su içeriği yeryüzünün modern ortalamasından çok daha fazladır -belki yüz kat daha fazla. Bu türden büyük kompozisyon farklılıkları kaotik ve şiddetli bir geçmişe işaret eder. Yeryüzündeki uçucu maddelerin

büyük bir bölümü uzayda kaybolmuş ya da örnekleyebileceğimiz noktanın çok ötesinde, çok derinlere gömülmüştür.

Yeryüzünün tahrip olmuş, soğuk siyah bir gezegenden daha serin, yaşanılabilir bir mavi gezegene erken dönemdeki dönüşümünün anlaşılmasındaki temel unsur, gezgin uçucu maddelerinin öyküsünde gizlidir. Fakat hiçbir uçucu madde yeryüzünün ilk yarım milyar yılından değişim geçirmeden çıkmamıştır. Tüm atomlar tekrar tekrar kullanıldığından, neredeyse tüm nitrojen ve karbon, tüm sülfür ve su binlerce kez dönüştürülmüştür. Kondrit gök taşları tahmin yürütmemiz için sayısal bir başlangıç noktası oluşturur; yeryüzünün ilk bir milyar yılından bilinen az sayıda kaya ve mineral örneği, Ay ve Güneş Sistemi'ndeki diğer objelerden gelen verilerle birlikte tahminlerimizi daha da iyi açıklar. Yeryüzünün ilk yüz milyon yılında manto ve kabuğun evriminin, yanı sıra bundan çok uzun zaman önce yıldızların oluşumunun anlaşılmasında geçerli olduğu gibi uygulanabilir olan her senaryonun anahtarı, söz konusu elementlerin değişmez özelliklerinin bilgisi -bu durumda bu bilgi, uçucu nitrojen, karbon, sülfür ve suyun fiziksel ve kimyasal özellikleridir.

Bu dört bileşen arasında, nitrojen baş edilmesi en kolay olanıdır. Birkaç mineral oluşturan, kaya oluşumunda neredeyse hiçbir rolü olmayan ve atmosferde yoğunlaşma eğilimi olan kimyasal açıdan etkisiz bir gazdır. Nitrojen döngüsü, ancak yaşamın yükselişinden sonra yeryüzünün dış katmanlarında önemli oranda etkili olmaya başlamıştır. Yeryüzünün oluşumunu izleyen bir iki milyar yıl içinde, yaşam ve oksijenin yoğun olduğu bir atmosfer yüzey alanını dönüştürdüğünde, karbon ve sülfür de çok daha fazla öne çıkacaktı. Fakat dördüncü bileşen olan su, başından itibaren Dünya'nın öyküsünün merkezinde oldu.

Su: Kısa Bir Biyografi

Suyun çeşitli jeolojik rolleri hidrojen oksidin özgün kimyasal özelliklerinden kaynaklanır. Hidrojenin bir, oksijenin ise sekiz numaralı element olduğunu hatırlayın; iki elementin de büyüklüğü iki ya

da on iki elektron sayısı yoktur. Elektron kabul eden her oksijen atomu, büyüğü on sayısına ulaşmak için iki elektron daha arar, öte yandan paylaşacak tek bir elektronu olan her hidrojen atomu bir elektron daha ister. Moleküler sonuç, hidrojenin oksijene ikiye bir oranıdır: H_2O . Bu yoğunlaşmış birimdeki atomlar bir V şekli oluşturur: Merkezdeki daha büyük oksijen atomu, Mickey Mouse'un kulaklarından farklı olmayan iki hidrojen çıkıntısıyla desteklenir. Hidrojen atomlarından iki elektron ödünç alan oksijen atomu, hafif bir negatif elektrik yükü içerir, öte yandan her hidrojen atomu buna paralel olarak biraz pozitifdir. Sonuç birbirine zıt pozitif ve negatif yüklü bölümleri (sırayla Mickey'nin kulakları ve çenesi) olan kutupsal bir moleküldür.

Su moleküllerinde bu türden bir kutupsallık pek çok farklı özelliği açıklar. Kutupsal su süper bir çözücüdür çünkü pozitif ve negatif uçları, diğer molekülleri ayırabilen baskın güçler kullanır. Sonuç olarak masa tuzu, şeker ve başka pek çok içerik suda hızla çözülür. Pek çok kayanın çözülmesi biraz daha zaman alır fakat milyonlarca yıl içinde okyanuslar neredeyse tüm kimyasal elementler açısından zenginleşmiştir. (Dolayısıyla okyanus suyunun her kilometreküpü, yaklaşık yüz seksen kilogram altın içerir -bu, çıkaracak teknolojimiz olmuş olsaydı, bu değerli metalin son dönemdeki yüksek değerinin 10 milyon dolardan fazlasına karşılık gelir.) Suyun çözülme ve diğer kimyasalları aktarma yönündeki bu benzersiz becerisi, aynı zamanda onu yaşamın kökenleri ve evrimi için ideal bir aracı hâline getirir. Yeryüzündeki tüm yaşam ve belki de evrendeki tüm yaşam suya bağlıdır.

Su moleküllerinin kutupluluğu, birbirlerine güçlü biçimde bağlanmalarına yol açar: Bir molekülün pozitif yönü, diğer moleküllerin negatif yönlerini çeker. Bu yüzden, buz sıra dışı ölçüde güçlü bir moleküler cisimdir (bu, daha önce buz pateni yaparken sert biçimde düşmüşseniz kısa sürede unutmayacağınız bir gerçektir). Moleküller arasındaki fevkalade güçlü bağ aynı zamanda suyun alışılmadık ölçüde yüksek bir yüzey gerilimi olmasıyla sonuçlanır -bu, küçük böceklerin su üzerinde gerçek anlamda yürümesine olanak sağlayan etkileyici bir özelliktir. Yüzey gerilimi

aynı zamanda kılcal harekete yol açar, bu da suyun damarlı bitkilerin köklerinden yükselmesine neden olur ve ağaçların yerden yüzlerce metre yukarıya yükselmesine olanak sağlar. Su moleküllerinin güçlü ortak çekimiyle bir araya getirilen yuvarlak yağmur damlaları, yüzey geriliminin bir diğer göstergesi ve yeryüzünün sıra dışı ölçüde hızlı su döngüsünün korunmasında hayati bir bağıdır. Metan ve karbondioksit gibi kutupsal olmayan uçucu moleküller bu tür damlacıklar oluşturamaz. Onlar sadece her yere nüfuz eden küçük sis dalgaları olarak atmosferde yüzer, dolayısıyla bu atmosfer gazlarının hâkim olduğu bir gezegende “yağmur” bilinmez olur.

Moleküller arasındaki güçlü bağlar suyun en ilginç ve önemli özelliklerinden bir diğeriyle sonuçlanır: Sıvı su, katı buzdan yaklaşık yüzde on daha yoğundur. Neredeyse bilinen her kimyasal bileşimde, katı sıvının içine çöker -bu sezgisel anlamda mantıklı bir durumdur çünkü moleküllerin katı maddelerdeki düzenli, tekrar eden paketlemesi, sıvılardaki rastlantısal dağılımlarıyla çelişir. Ayakkabı kutularını bir ayakkabı mağazasının arka odasına depoladığınızı hayal edin. Düzenli yığınlar ve kutu sıraları (katı kristal bir yapıda kusursuz biçimde hizalanmış moleküller gibi) sıradan bir yığından çok daha az yer kaplar (tıpkı bir sıvının içinde kaotik biçimde yuvarlanan moleküller gibi). Fakat suyun içinde, rastlantısal sıvı durumlarıyla moleküller, aslen düzenli buz kristalleri içinde olduğundan daha etkin biçimde paketlenir.

Önemli olan sonuç, buzun, ister içkinizdeki bir küp, donmuş bir nehir ya da akarsudaki bir katman veya dev bir buz dağı olsun, yüzmesidir. Bu sıra dışı özellik olmasaydı pek çok su kütlesi, her kış kalın, koruyucu bir yüzey katmanı oluşturmak yerine, dipten tepeye kadar kaskatı donardı. Bu türden katı biçimde donmuş bir dünyada, soğuk ekosistemlerdeki su yaşamı ciddi biçimde zorlanırken, hayati su döngüsü durma noktasına yaklaşırdı. İlginç biçimde, aynı olgu (küçük de olsa) buz patenini ve kaymayı kolaylaştıran çeşitli unsurlardan biridir. Pateninizin bıçağı tarafından kullanılan, katı buza baskı yapan yüksek basınç, üzerinde kayabileceğiniz daha yoğun bir sıvı su katmanının oluşturulmasına yardımcı olur. Hava çok soğuyacak, tipik olarak -73 dereceye kadar

inecek olursa kaygan su katmanı oluşmaz ve buz pateni ve kaymak çok daha zor hâle gelir.

Fakat “saf” suyun bir diğer farklı özelliği de saflıktan yoksun oluşudur. Ne kadar dikkatli biçimde filtrelense ya da damıtılsa da su *asla* bütünüyle H_2O moleküllerinden oluşmaz. Bu üç atomlu birimlerin küçük bir bölümü, kaçınılmaz olarak pozitif yüklü hidrojen iyonlarına (hidronlara ya da aslında yalnızca herhangi bir elektronun eklenmediği tekil pozitif yüklü protonlar olan H^+ iyonlarına) ve negatif yüklü hidroksil gruplarına (OH^- iyonlarına) bölünür. Hidronlar hızla su moleküllerine bağlanarak H_3O^+ hidronyum iyonlarını oluşturur. Oda sıcaklığında saf su dediğimiz şey, 7 pH’a dönüşen bir konsantrasyonda, eşit sayılarda pozitif hidronyum ve negatif hidroksil grupları içerir (kimyasal bağlamda litre başına 10^{-7} hidronyum grubu moleküllerinden oluşan bir “hidrojen gücü”).

Yeryüzünün ilk okyanuslarına ilişkin temel tartışma konularından biri, pH ve tuz içerikleridir. Su pek çok pisliği kolaylıkla temizler, bunlardan bazıları sodyum (Na^+) ya da kalsiyum (Ca^{2+}) iyonları gibi pozitif yüklü, diğerleri ise klor (Cl^-) ya da karbonat (CO_3^{2-}) iyonları gibi negatif yüklüdür. Temel kural, büyük miktarda herhangi bir su çözeltisinin net elektriksel yükünün sıfır olması zorunluluğudur: Pozitif yüklerin toplam sayısı eşit sayıdaki negatif yüklerle dengelenmelidir. Oda sıcaklığı koşullarındaki saf suda, 10^{-7} H_3O^+ moleküler ağırlıkları kusursuz biçimde 10^{-7} OH^- moleküler ağırlıklarıyla dengelenir. Ancak asitlerde fazla H_3O^+ ’nın (hidroklorik asit, HCl ’deki klorin gibi) negatif iyonları dengelemesi gerekir. Bazlarda, fazla OH^- ’nin (baz sodyum hidroksitteki sodyum, $NaOH$ gibi) pozitif iyonları dengelemesi gerekir.

Asit ve bazların gücü, pH skalasıyla ölçülür. Daha düşük pH değerleri, OH^- iyonlarından daha fazla H_3O^+ ’ya sahip asidik çözeltilere işaret eder. pH’ı 6 olan hafif asitli bir çözelti (ki bu pek çok bölgede işlenmemiş musluk suyunun tipik bir özelliğidir) pH 7 iken nötr bir çözeltilerden on kat fazla hidronyum iyonu içerir. Daha yoğun oranda asit içeren sıvılar arasında kahve (yüz kat daha fazla H_3O^+ içeren pH 5), sirke (on bin kat daha fazla H_3O^+ içeren pH

3) ve limon suyu (yüz bin kat daha fazla H_3O^+ içeren pH 2) bulunur. Buna karşılık, bazlar H_3O^+ 'dan çok OH^- içeren sıvılardır, dolayısıyla pH değerleri 7'den daha fazladır. Ortak bazlar arasında sodyum bikarbonat (pH 8.5), magnezyum oksit sütü (pH 10 içeren sıradan bir asit giderici) ve ev amonyak temizleyicileri (pH 12) bulunur. Göreceğimiz gibi, yeryüzünün ilk okyanuslarının pH ve tuzluluk oranı hararetle tartışılan bir konu olmayı sürdürür.

Su, Her Yerde Su

Su, evrende en çok bulunan kimyasallardan biridir. Ne kadar çok bakarsak, o kadar fazla şey buluruz ve diğer gezegenlerdeki, uydulardaki ve kuyruklu yıldızlardaki varlığı, evrendeki suya bağımlı yaşamın olası dağılımının yanı sıra yeryüzündeki bolluğunun da ipuçlarını sunar. Teleskopik gözlemler aldatıcı olabilir çünkü suyun yoğun olduğu atmosferimiz, daha uzak kaynaklardaki en derişik H_2O çökeltileri dışında tümünü gizleme eğilimindedir. Ancak uzayın derinliklerindeki bazı objeler, kızıl ötesi ışıınımı farklı biçimde emişleriyle buzlu bir yüzeyi açığa çıkarır.

Bu spektroskopik parmak izi, bazı kuyruklu yıldız ve asteroidlerin önemli oranda donmuş su içerdiğini açığa çıkarır. Gökbilimciler Güneş Sistemi'mizde, Plüton ve eşlikçi uydusu Charon'dan, Satürn'ün ışık yayan buz yüzüklerine kadar sayısız buzlu dünya belgelemiştir. Gaz bulutundan oluşan tüm gezegenler, ağırlıklı olarak hidrojen ve helyumdan oluşmalarına karşın yoğun atmosferlerinde önemli su buharı hazneleri bulundurur. Bugün Jüpiter'in büyük uyduları Europa ve Callisto'nun da, çok daha derin, döngüsel su okyanusları üzerinde, birkaç kilometre kalınlığında bir buz kaplaması içerdiği düşünülmektedir.

Eve daha yakın olan diğer karasal gezegenler ilk bakışta oldukça kuru görünür. Ancak NASA'nın Merkür'e *Messenger* görevi yoluyla gerçekleştirilen yakın zamana ait gözlemlerde, donmuş kutup kraterleri içinde yakında bulunan Güneş'ten sürekli korunan bol miktarda buz çökeltisi tespit edilmiştir. Bir sonraki gezegen olan Venüs'te başlangıçta, Dünya'dakine benzer oranda

su bulunmuş olabilir fakat bugün yüzeye yakın H₂O'dan neredeyse bütünüyle yoksun görünüyor. Kalın, aşırı ısınmış karbon-dioksit atmosferi gizli sera etkisini ve oluşumu sırasında bulunabilecek yüzeye yakın bilinmeyen miktardaki suyun kaybedilmiş olduğunu gösteriyor.

687 günlük Mars mevsimleriyle uyum içinde genişleyen ve gerileyen beyaz kutupsal buz örtüleriyle Mars'ın bütünüyle farklı bir öyküsü vardır. Gökbilimciler uzun süre kırmızı gezegenin suyun bulunduğu, canlı bir dünya olabileceği yorumunda bulunmuştur. 1870'lerde, Mars'ın Dünya'nın yörüngesine özellikle yaklaştığı bir sırada, İtalyan gökbilimci Giovanni Schiaparelli doğal, muhtemelen su içeren kanallar ya da İtalyanca *canali* diye yorumladığı karanlık, çizgisel özellikler belgelemiştir. Özgün betimlemelerinin İngilizce çevirilerinde bunlar hatalı, yüksek teknolojiyle tasarlanan yapıları imleyecek biçimde kanallar olarak adlandırıldığında, soyu tükenmiş, zeki bir Marslı ırkı fikri önüne geçilemez duruma gelmiştir. Bu Mars yaşamı meraklılarının en önemlilerinden biri, 1890'larda, Schiaparelli'nin keşiflerini saplantı hâline getiren Harvard eğitilmiş gökbilimci Percival Lowell'dı. Ailesinden kalan mirası Flagstaff, Arizona'da özel bir gözlem evi inşa etmek için kullandı ve burada kendisini Mars üzerinde yaptığı çalışmalara adadı. Berrak Arizona göklerinde, teknoloji harikası altmış santimetrelilik bir teleskop kullanarak, buzlarla kaplı olduğu düşünülen kutuplardan kurutulmuş Ekvator'a kadar geniş bir kanallar ağını çözümleyebileceğini hayal etti. Lowell, oldukça popüler olan kitapları *Mars* (1895), *Mars and Its Canals* (1905) ve *Mars as The Abode of Life* (1908)'de, kaybolan, su kıtlığı çeken bir ırkın, çaresizlik içinde ürettiği son teknolojik başyapıtı betimler.

Lowell'in renkli tasavvurları, (H.G. Wells'in 1898 yılı klasiği, *Dünyalar Savaşı*'nın da aralarında bulunduğu) bir bilim kurgu öyküleri ve romanları dalgasını tetiklemiş, fakat bilim camiasını, Mars'ta hayat olması bir yana, su bulunduğuna dahi ikna etme yönünde pek az katkı sağlamıştır. Bunu izleyen, gittikçe daha büyük teleskopların kullanıldığı, yüz yıldan uzun süren, (1965'te Mariner 4'le başlayan) kısa süreli sofistike Mars yakın uçuş görevleri,

uydular (Mariner 9, 1971 yılındaki ilk uyduydı) ve (1976'da Viking'le başlayan) uzay araçlarıyla desteklenen çalışmalara karşın, Mars'taki su kaynaklarına ve bu kaynakların önemli boyutuna ilişkin aydınlatıcı kaynakların güvenilmez olduğu ortaya çıkmıştır. Kuzey kutup bölgelerinde su buzunun varlığı, sonunda, 1970'lerin sonlarındaki spektral ölçümlü Viking görevleriyle açık biçimde belgelenmişti, fakat Mars'ta bulunan suyun gerçekteki büyük miktarı ve zengin kaynaklarının yapısı ancak 2000 yılından sonra, en yeni teknolojiyle üretilen uyduların üzerindeki sayısız araçla, yanı sıra Phoenix, Spirit ve Opportunity uzay araçları üzerindeki kazı aletleriyle doğrulanabildi.

Bugün, Mars'taki suyun büyük bir bölümü yer altı donmuş tabakası ve belki daha derin ılık bölgelerde (potansiyel olarak, en dıştaki kuru tabakadan gizli kalan dev havuzlarda) yer altı suyu olarak görülüyor. Bu yer altı suyunun boyutlarının ipuçlarını, 2002 yılında, sofistike bir nötron tayfölçeri taşıyan Mars Odyssey uzay aracı sunmuştu. Kozmik ışınlar Mars'ın yüzeyini bombaladığında, hidrojenin yoğun olduğu (yani su içeren) çökeltelerde nötronlar çıkarabilirler. Tayfölçer, bu türden nötronları, Mars yüzeyinin geniş bir alanından Ekvator'a, yüksek enlemlere yayılırken tespit etmek üzere tasarlanmıştı. Ancak bu ilginç sonuçlar cevapladıkları kadar çok soruyu gündeme getirdi çünkü suyun net formu (sıvı mı, buz mu yoksa mineral mi olduğu) belirlenemiyordu.

2007 yılında, NASA'nın Mars Keşif Aracı, yer radarı kullanarak, bu gömülmüş suyun çok daha yüksek çözünürlüklü bir resmini sundu. Bu öncü ölçümlerle, orta-güney enlemlerde dağ buzulu boyutunda buz birikintileri tespit edildi. Daha yakın bir zamanda, Avrupa Uzay Ajansı'nın Mars Express Uydusu, gezegenin daha geniş bir alanı boyunca uzanan derin buz kütesini tespit etmek için benzer bir radar sistemi uyguladı. Gerçekten de Mars'ta yüzlerce metre derinliğinde, yerküreyi kaplayan bir okyanusa eş değer miktarda donmuş yer altı suyu bulunabilir. Dolayısıyla yeryüzündeki okyanusların bir zamanlar Marslı bir kuzeni olmuş olabilir.

Su aynı zamanda farklı kaya ve minerallerin varlığıyla da açığa çıkarılabilir. NASA'nın Mars Express, Phoenix aracı ve azimli Spirit

ve Opportunity araçları, su-kaya etkileşimiyle oluşturulan mineral türlerinde bol miktarda bütünleyici kanıt bulmuştur. Suyun bol miktarda olduğu kil minerallerinin, Mars'ın yüzeye yakın çevresinde bilindik bir olgu olduğu görülür ve nötron deneylerinde yıllarca önce gözlemlenen hidrojen-yoğun minerallerin büyük bölümünü temsil edebilirler. Kurumuş göllere ya da okyanuslara özgü evaporit mineraller de sıkça görülür, tıpkı opal (kuvarsın, tipik olarak sıcak su tortulardan sızdıkça oluşan yetersiz ölçüde kristalleşmiş bir türü) gibi.

Gezegenler üzerine çalışan bilim insanları kırmızı gezegeni yeni bir gözle incelediğinde, onlar da suyun bir zamanlar yontulmuş Mars yüzeyinde özgürce aktığına ilişkin gitgide daha fazla kanıt olduğunu görür. Yüksek çözünürlüklü fotoğraflar, iri kaya parçalarının saçıldığı nehir vadilerini ve sel yataklarını, gözyaşı biçimli adaları, toprak kaymalarını ve örülmüş akarsu yataklarını açığa çıkarır. Bu arazi şekilleri sığ göl ya da denizlerde bırakılmış gibi görünen tortu katmanlarını deler. Gerçekten de Mars'ın kuzey yarım küresini kuşatan sahil benzeri teraslar kuzey enlemindeki okyanusların bir zamanlar Mars yüzeyinin üçte birden fazlasını kaplamış olabileceğine işaret eder. Durum buysa daha soğuk olan Mars, yeryüzünün oluşumundan milyonlarca yıl öncesine ait, mavi, yaşam veren bir gezegen olabilir.

Bir de Ay var -Ay, kendisinden büyük olan yol arkadaşı Dünya'da bulunan suyun tarihinin anlaşılmasında kilit bir rol oynar. Ay, yaygın inanışa göre kupkuru (aslında çöl güneşinde kavrulduğunda bile kayda değer bir su bileşenini koruyan kemikten daha kuru)dur. Sayısız kanıt bu çoraklığa işaret eder: Dünya merkezli teleskoplar hiçbir karakteristik kızıl ötesi soğurum açığa çıkarmaz; altı Apollo iniş alanında bulunan Ay kayalarında saptanabilir hiçbir su izi bulunmamıştır (en azından 1970 analitik standartlarına göre) ve Ay yüzeyinde geçirilen dört milyar yıldan sonra kirlenmemiş demir metalin bulunması, aşındırıcı suyun olması ihtimalini bile olanaksızlaştırır gibidir.

Bu da yaygın inanışlara dair gülünç bir durumdur. Nihayetinde biri, herkesin doğru olarak bildiği bir şeye meydan okuyacak ve ara

sıra gerçekten ilginç bir şey bulunacaktır. 1994 yılında, Clementine görevinin tek bir gösteri uçuşu su buzuyla tutarlı radar ölçümleri ortaya çıkardı ancak gezegenler üzerinde çalışan bilim insanlarından pek çoğu ikna olmamıştı. Dört yıl sonra Ay Maden Arayıcısı, kutupların yakınlarında hidrojen atomlarının kayda değer bir birikimini, dolayısıyla muhtemelen buz ya da buz içeren mineraleri tespit etmesi için nötron tayf ölçümü yaptı. Bununla beraber, pek çok uzman, Güneş rüzgârından gelen implant hidrojen iyonlarının sinyalin bir kaynağı olma ihtimalinin daha fazla olduğuna işaret etti. Daha sonra, 2009 yılının Ekim ayında, NASA bu kraterlerden birinin içinde bir Atlas roketinin üst bölümünü parçaladı (Ay'ın güney kutbundaki Cabeus krateri) ve H₂O sinyallerini bulmak için darbe enkazından çıkan duman bulutlarını inceledi. Toz serpintisi, beklendiği gibi yaşam belirtisi içeren unsurların küçük fakat önemli bir oranını içeriyordu (Ay'dan çıkarılan suyla ve bunun olası kökenleriyle yeniden ilgilenmeye başlamak için yeterli bir orandı bu.) Aynı yıl Ekim ayında, *Science* dergisinde art arda yayımlanan makaleler, Ay'da su bulunduğunun artık tartışmasız biçimde kanıtlandığını ortaya koyuyordu.

Çalışmalara Erik Hauri ve Carnegie Enstitüsü'nden meslektaşları da dâhil oldu. Hauri'nin ekibi bir iyon mikroprobu (Apollo örnekleri üzerinde çalışan ilk bilim insanlarının erişemediği oldukça duyarlı bir araç) kullanarak, benim 1976 yılındaki ilk jeoloji işimde Ay zerrelerini çıkararak üzerinde çalıştığım türdeki renkli cam boncukları yeniden ele aldı. Diğer bilim insanları, bundan onlarca yıl önce, su bulgularına erişmek için cam boncuklar üzerinde çalışmıştı fakat tespit kapasiteleri, iyon mikroskobunun ölçümleri üç santimetrenin milyonda biri skalasında çözümleme becerisiyle örtüşmüyordu. Hauri ve meslektaşları çeşitli cam boncukları cilaladı, böylelikle yuvarlak en kesitleri iyon sondasında açığa çıkarılıyordu. Boncukların dış yüzeylerinin oldukça kuru olduğu ortaya çıktı, milyonda yalnızca birkaç kısım su içeriyordu fakat en büyük boncukların özlerinde milyonda yüz oranında su bulundu. Milyarlarca yıl içinde, cam boncuklardaki özgün suyun büyük bölümü uzayda buharlaşmış, bu özlerden çok dış bölümlerde gerçekleşmiştir. Ancak

boncukların derinliklerinde kalan kayda değer orandaki su miktarı dikkate alındığında Hauri ve meslektaşları Ay'ın magmasındaki özgün su içeriğinin milyonda 750 parça boyutunda olabileceğini hesaplar -bu, yeryüzündeki pek çok volkanik kayayla karşılaştırılabilecek büyük bir su miktarıdır ve bundan milyarlarca yıl önce, magmayı patlayıcı püskürmelerle saçacak olan yüzeydeki volkanik faaliyetleri yürütmek için gereğinden fazla bir orandır.

Şayet Ay'ın geçmişinde bu miktarda su volkanlara güç sağladıysa Ay'ın donmuş yüzeyinde hâlâ oldukça fazla miktarda su saklı olmalıdır. Ay öncelikle Theia'nın yeryüzünün ilkel mantosundan bütünüyle kazınmasıyla oluştuğu için de gezegenimizin en derin bölgeleri de muhtemelen görülmeyen olağanüstü oranlarda su içermektedir.

Görülebilen Su Döngüsü

Sonunda Mars'ta ya da Ay'da ne kadar su bulabilirsek bulalım (ki bugün bu miktar oldukça fazla gibi görünüyor) Dünya, Güneş Sistemi'mizin biricik su dünyası olmayı sürdürüyor. Yeryüzündeki suyun öyküsü -ne miktarda olduğu, görünümü, nerede bulunduğu ve nasıl hareket ettiği- biraz karmaşıktır. 1990'lara kadar, okyanusların yeryüzünün erişilebilir envanterinin yüzde doksan altısını barındıran, bilinen en geniş su deposu olduğu düşünülüyordu. Bugün yaklaşık yüzde üç oranındaki (ve muhtemelen buzul çağı gelişiminin zirve yaptığı noktalarda yüzde beş ya da altı oranından fazla olmayan) buz tabakaları ve buzullar ikinci sırada gelir. Yer altı suyu (hem iyi tanımlanmış yer altı su tabakalarında hem de daha geniş kapsamda yaygın haznelerde bulunan yer altına yakın tüm H_2O) yüzde birlik orana karşılık gelir, öte yandan tüm göller, nehirler, akarsular, göletler ve atmosfer bir arada, yeryüzünün yüzeye yakın su haznesinin yüzde birinin yüzde birlik bir bölümünden fazlasını temsil etmez.

Bütün bu sular sürekli hareket hâlinde ve günler ile milyonlarca yıl arasında bir yelpazede, bir hazneden bir başkasına yer değiştirir. Dinamik, yaşamı besleyen su döngüsü, sürekli değişen

gezegenimizde en bariz değişim kaynağını temsil eder. Tek bir su molekülünün olası dolaşımını hayal edin -bir oksijen atomu ve iki hidrojen atomundan oluşan ve milyarlarca yıl boyunca var olan bir molekül. Muazzam Pasifik Okyanusu'ndaki, yeryüzündeki yüzeye yakın su moleküllerinin zamanlarının büyük bölümünü geçirdiği molekülümüzden başlayın. Büyük bir soğuk su okyanus nehri olan California Akıntısı, bu molekülü Alaska yakınlarından, güneye California sahiline, Baja'ya ve Ekvator'a doğru sürükler. Çevredeki su ılınıp yükseldikçe, molekül de okyanus yüzeyine yaklaşır ve Kuzey Pasifik çevresinde, saat yönünde epik bir yolculuğa başlar -öncelikle Japonya'nın yakınından kıvrılarak geçip batıya doğru dökülen Kuzey Ekvatorial Akıntısı, sonrasında doğuya, Kuzey Amerika'ya yönelen Kuzey Pasifik Akıntısı. Molekülümüz bir kez daha Kaliforniya'ya yaklaştıkça, Güneş'in aydınlattığı okyanus yüzeyine doğru yükselir ve bulutların oluşmakta olduğu atmosferde buharlaşır.

Yaygın rüzgârlar yoğunlaşan yağmur bulutları kütlesini doğuya, Güneybatı çölüne, Rocky Dağları'nın yüksekteki bölgesine doğru savurur. Bulutlar daha yüksek, daha serin yükseltilere doğru çıktıkça yağmur yağmaya başlar. Sonunda molekülümüz bir yağmur damlasının parçası olarak yeryüzüne düşer; dereden çaya, akarsuya ve yatağından taşan kabarık bir nehre doğru dolambaçlı bir yol izler. Su molekülünün hareketleri bu noktaya kadar hızlıydı -tüm Pasifik Okyanusu'nu aşmak için bir iki yıl, bulutlara karışıp yağmur olarak düşmek için bir ki gün, tepelik araziden akmak için bir iki hafta. Fakat molekül yerin derinliklerine sızarak geniş, gizli bir yer altı su tabakasıyla birleştiğinde, yüzeyin altındaki bölgeye doğru sürünürken binlerce yılını harcayabilir.

Burada insan eylemleri doğanın eski ritmini değiştirir çünkü su arsız çiftçiler, yarı kurak güney batı bölgesinde yapılan tarımı sürdürebilmek için çok büyük miktarlarda su pompalar. Böylelikle, sularını varlıklarını sürdüremeyecekleri oranlarda yitiren yer altı su tabakaları kurur. Molekülümüz bu eğilime yenik düşer ve kendini yeniden yüzeyde, bir kez daha hızla bulutsuz gökyüzüne

doğru buharlaştığı ve doğruya doğru yaptığı yolculuğu sürdürdüğü bir Teksas mısır tarlasına taşar durumda bulur.

Bu öykü, bitimsiz bir döngü içindedir. Bazı moleküller geçici olarak hidronyum ve hidroksil iyonlarına bölünür ve yeni atom arkadaşları olan yeni su moleküllerinde birleşir. Diğer moleküller milyonlarca yıl boyunca kilitli kalacakları kalın Antarktika buzunun içinde donar. Diğer su molekülleri de topraktaki kil minerallerinin bir parçasına dönüşecek biçimde kimyasal reaksiyonlar geçirir.

Hayat su döngüsünün de ayrılmaz bir parçası olmuştur. Bitkiler su moleküllerini ve karbondioksiti alarak bunları Güneş güdümlü fotosentez sürecinde, kökler, saplar, yapraklar ve meyve üretmek için birleştirir. Besin maddelerinin yoğun olduğu bu bitki dokuları hayvanlar tarafından yenildiğinde ve metabolik solunum mucizesiyle bozulduğunda da aldığımız her nefesle çıkarılan atıklar karbondioksit ve suyun yeniden birleşen molekülleridir.

Derin Su Döngüsü

1980'lerin ortalarında yeryüzündeki bilim insanları, yüzeye yakın su döngüsü hikâyesinin tamamını oluşturmaya başladılar, su hakkında küresel boyutta ciddiyetle düşünmeye başladı. Kaynakları onlarca ya da yüzlerce kilometre aşağıda olan magmaların patlayıcı volkanik faaliyetlere neden olacak yeterlikte su içerdiğini bildiğimizden, gezegenimizin derinlerinde kristalleşen silikat minerallerin bir şekilde H_2O 'yu pusuya düşürmesi gerektiğini varsayabiliriz. Su döngüsünün, bize yeryüzünün nasıl bugün olduğu okyanuslarla yıkanan gezegene dönüştüğü hakkında çok şey söyleyebilecek derin, gizli bir bölümü olmalı.

Derin suya deneysel yaklaşım, en sık görülen minerallerin (olivin, piroksen, granat ve yeryüzünün derinliklerindeki daha yoğun değişkenlerin) manto koşullarında az miktarda su içerebileceği olasılığına odaklanmıştır. 1990'larda yüksek basınç mineralojisinin başlıca konusu hâline gelen suyun "nominal açıdan anhidrik" mineraller içinde incelenmesi, şaşırtıcı sonuçlar vermiştir. Yüksek basınç ve ısı altında, bazı minerallerin suyun mineralojik eş değeri

olan bol miktarda hidrojen atomu içermesinin görece kolay olduğu ortaya çıkmıştır (çünkü hidrojen atomları bu minerallerin içindeki oksijenle birleşir). Patlamaya hazır volkanik hareketlerin sığ kabuğun daha serin, düşük basınçlı çevrelerinde değişmez biçimde kuru olan mineraller, derin mantoda oldukça nemli hâle gelebilir.

Deneysel strateji prensipte oldukça dolaysızdır. Bir olivin ya da piroksen örneğini ele alın, su ekleyin, sıkarken ısıtın ve suyun nereye gittiğini görün. Bu pratikte çok kolay değildir. Yeryüzünün derin manto koşullarının yeniden üretilebilmesi için örneğin atmosfer basıncının yüzbinlerce katına kadar (santimetrekare başına milyonlarca kiloya eş değer) basınç altında bırakılması ve aynı anda 2.200 derece sıcaklıkta ısıtılması gerekir. Bilim insanları bu ürkütücü beceriyi edinebilmek için birbirini tamamlayan iki yüksek basınç yaklaşımını uygular.

Bazıları küçük bir örnek üzerine tonlarca basınç uygulayan muazzam, oda boyutunda metal preslere dayanır -bunlar Hat Yoder'ın yarım yüzyıl öncesine ait basınç bombasının ayrıntılı değişkenleridir. Sıkça kullanılan deneysel montajlardan biri, Rus matruşkaları gibi iç içe geçmiş dört evre içerir: Her evre diğerini çevreler ve kucaklar ve gitgide küçülen bir hacme uygulanan olağanüstü basınçlara odaklanır. Öncelikle, dev bir çift metal levha, yukarıdan ve aşağıdan binlerce tona erişebilen müthiş bir güçle baskı yapar. Bu dev levhalar, üçü yukarıda üçü aşağıda olmak üzere altı eğimli, birbirine kenetli çelik örs içeren uç ikinci evreyi mengene gibi kavrar- bu evreler de karşılık olarak, sekiz tungsten karbür örsten oluşan, küp şeklinde bir küme içeren üçüncü bir aşamaya karşı, her yönden eşit oranda baskı uygular. Toz hâline getirilmiş minerale su örneği en içteki dördüncü evrede, reaktantların kenarlardan taşmaması için sıklıkla altın ya da platin bir astarla sıkıca kaplanmalıdır. Basınç oluşturmak yeterince zor değilmiş gibi örnek aynı zamanda örnek tutucunun derinlerine gömülen elektrikli ısıtıcılarla pişirilmeli ve ısı sürekli termokupl denilen özel bir kablonun hassas döngüsüyle ölçülmelidir.

Dünya'nın derinliklerinin simülasyonunu yapma yönünde bir diğer popüler deneysel yaklaşım da iki elmasın düz uçlarla

birleştirilmesiyle uç noktada basınçlar oluşturan hücre tabanlı elmadır. Önce, tıpkı eski düğün yüzüklerindeki taşlara benzeyen iki tipik bir buçuk karatlık parlak kesimli elmas mücevherini alın ve dipteki keskin uçları, üç santimetrenin yirmide biri kadarını taban yüzeyine dönüştürecek şekilde, düz, dairesel hareketlerle cilalayın. Daha sonra elmasları kusursuz biçimde hizalanmış metal bir mendenin içine yığın ve aralarına küçük bir deliğin açıldığı ince bir metal parçası yerleştirin. Deliği karşı karşıya duran hücre tabanlı elmasların üzerine getirin, içini su ve mineral tozuyla doldurun ve sıkın. Elmaslar üzerinde kullanılan ortalama bir güç olağanüstü bir basınç yaratır çünkü tabanlar çok küçüktür, dolayısıyla gücü odaklarlar. Hücre tabanlı elmaslar, yeryüzünün iç dolgununda bulunan üç milyon atmosfere eş değer rekor seviyede yüksek basıncı sürdürür. Hücre tabanlı elmasların güzelliği, basınçlandırılmış örneğinizi şeffaf taşların içinden bakarak görebiliyor oluşunuzdadır. Bir analitik spektroskopik teknikler dizisi uygulanabilir ve örneği, Hücre tabanlı elmasların içinden de parlayabilen manto koşullarına erişene kadar ısıtmak kolaydır.

Her şey yolunda gidecek olursa (istenilen basınç ve ısılara ulaşılır ve bu basınç ve ısılar korunursa, termokupl kırılmazsa, örnek sızdırmazsa) alengirli analitik görevler başlar. Kıl ve mika gibi su içeren bazı mineralleri tanımak kolaydır fakat normalde kuru olan bir örnekte suyun milyonda birkaç birimini nasıl ölçersiniz? İyon sondası seçeneklerden biridir; yüksek duyarlılığı ve mekânsal çözünürlüğü, Erik Hauri'nin Ay yüzeyindeki volkanik camlarda eser miktarlarda su keşfiyle sonuçlanmıştır. Oksijen ve hidrojen arasındaki karakteristik bağları açığa çıkarabilen kızıl ötesi görüme gözlemlene, bir diğer işlevsel araçtır. Hidrojen ve oksijen arasında yeni oluşan bağlar, kızıl ötesi radyasyonun kristalle etkileşim kurma biçimini -suyun mineral yapıya girişini açığa çıkarabilen değişiklikleri- değiştirir. Ancak dikkatli meslektaşlar (ki ihtiyatlı rakipler atlatılmayı hiç istemez) deneylerin kusurlu ve analitik tekniklerin fazla duyarsız olması ihtimalini her zaman arttıracaktır. Tek bir sıvı -mikroskopla görülemeyecek kadar az

miktarda su- eklenmesi, bu tür titizlik gerektiren ölçümlerde yanlış bir belirti verebilir.

Her yeni bilimsel çabada olduğu gibi bu deneylerin anlaşılması da biraz zaman almıştır fakat inceleme yapan bilim insanlarının sayısı arttıkça, daha fazla mineral derin suyun olası ev sahipleri gibi görünmeye başlamıştır. Alt kabuktaki olivin ve piroksen oldukça kurudur, yüzde birden fazla oranda su tutmazlar. Fakat basıncı 100.000 atmosferlik manto koşullarına ve ısıyı 1.100 dereceye çıkardığınızda olivin *wadsleyite* dönüşür ve *wadsleyit* de yüzde üçlük oranda su içerebilir. Mantonun yaklaşık 410 kilometreden 660 kilometreye ulaşan geçiş bölgesi olan benzer Dünya katmanı, gezegende en çok su barındıran yerlerden biridir ve okyanuslardaki tüm suyun dokuz katını içerebilir. Alt mantoda bulunan mineraller daha az su doludur fakat geniş hacimleriyle (yeryüzünün tamamının yarısı) bunu telafi ederler, dolayısıyla alt mantonun yeryüzündeki okyanuslarda bulunan suyun altı katını daha içerdigi tahmin edilir. Su yönünden zengin diğer mineraller ve yeryüzünün demir çekirdeğinde de muhtemelen bol miktarda hidrojen bulunduğu göz önüne alındığında, derin iç bölgenin sekiz okyanustan fazlasına eş değer su barındırabileceği söylenebilir.

İlk Okyanus

İhtiyatlı tahminler ilksel Dünya'nın özgün uçucu madde bütçesini modern seviyelerin yüz katından fazla bir boyuta taşır. Gerçekten de yeryüzündeki uçucu maddelerin tarihinin modellemesindeki başat güçlüklerden biri, kaybedilen oranın (ve nasıl kaçırıldığının) anlaşılmasıdır.

Bazı şeylerden emin olabiliriz. Uçucu maddeler ilk günden itibaren, devasa volkanlar hızla kalınlaşan bir atmosfere büyük miktarlarda buhar pompaladıkça derinliklerden olağanüstü biçimde salınmıştı. İlksel Dünya'nın varlığının ilk birkaç milyon yılı süresince, bu ilk atmosfer, modern dünyanın atmosferinden çok daha yoğun olmuş olabilir. Su yüzeye sıvı şeklinde akmış, ilk kayaları

soğutmuş ve birkaç on milyon yıl içinde geniş, sığ denizler oluşturmuş olabilir.

Ve sonra Büyük Darbe tüm bunları savurdu. Yüzeye çıkabilen neredeyse her molekül, dev bir sıfırlama düğmesine basılmış gibi uzayda kayboldu. Yeryüzündeki nitrojen, su ve diğer uçucu maddelerin ne kadarının bu tek olayda kaybolduğuna ilişkin hiçbir makul tahminimiz yok fakat kayıp büyük ölçülerdeydi. Yüz altmış kilometrekarelik kayaların daha küçük skalada düzinelerce darbesi, bir beş yüz milyon yıl daha hayal edilemeyecek bozulmalara yol açtı, bu darbelerin her biri okyanusların önemli bir bölümünü buharlaştırdı ve uçucu madde envanterini daha da küçülttü.

Bununla beraber, Büyük Darbe'yi izleyen birkaç milyon yıl içinde, su buharı yeniden primordiyal atmosferin başat bir bileşenine dönüşmüş, karanlık bulutların, uğultulu rüzgârların, yıkıcı yıldırımın ve bitmeyen şiddetli yağmurun küresel bir tapınağını oluşturmuştu. Deniz seviyesine yakın havzalar kademeli olarak dolup yavaş yavaş okyanusları oluşturdukça fırtınanın kamçıladığı bazalt kabuğun yüzeyi soğudu ve katılaştı. Yüzey suyunun ince örtüsü çatlak ve yarıklara nüfuz ettikçe, aşağıdaki sıcak kayalarla etkileşime geçtikçe ve yüzeye uğultulu buhar ve aşırı ısınmış suyun devasa gayzerleri olarak döndükçe sınırı aşan denizler bir süreliğine küresel bir sauna oluşturdu. Bu türden yoğun su-kaya etkileşimleri kabuk soğumasını hızlandırma ve önce daha derin göletlerin, sonra göllerin ve okyanusların oluşumunu sağlama işlevi gördü.

Küresel okyanusun tam olarak ne zaman oluştuğu bilinmemektedir fakat heyecan verici kanıtlar yeryüzünün en eski kristalleri biçiminde ortaya çıkmıştır. Yeryüzündeki en eski kayalar, bazıları, Batı Avustralya'nın Jack Hills olarak bilinen kurak, koyun çiftliği bölgesinde bulunan üç milyar yaşındaki tortu katmanlarıdır. Bu tortuları oluşturan kum boyutundaki mineral ve kaya parçaları, çok daha yaşlı olması muhtemel, yok olan kaya oluşumlarından aşınarak kopmuştu. Bu kum tanelerinin, milyonda birden fazla bulunmayan küçük bir kısmı, zirkon minerallerinden (zirkonyum silikat, $ZrSiO_4$), doğadaki en katı materyallerden birinden yapılmıştır.

Tipik olarak bu cümlelerin sonundaki noktadan daha küçük olan zirkon taneleri, başlangıçta volkanik kayalarda küçük bir yardımcı mineral olarak oluşmuştur. Bazaltın zirkonyum elementinin yalnızca bir izini taşıyan bir eriyikten katılaştığını hayal edin. İster nadir bulunsun, ister yaygın olsun, kimyasal elementlerin büyük bir bölümü, kolaylıkla piroksen, olivin ve feldispatın kristal yapılarına dâhil olur. Fakat yaygın olarak görülen minerallerde zirkonyumun hiçbir şekilde yeri yoktur. O daha çok kendi türünü arar, dolayısıyla izole, küçük zirkon kristalleri oluşturur.

Pek çok unsur, kolaylıkla gözden kaçırılan bu zirkon kristallerini yeryüzünün ilk evresine ilişkin özgün bir iç görü kaynağına dönüştürecek biçimde bir araya gelir. Öncelikle, zirkonlar neredeyse sonsuza dek var olabilir (en azından Dünya tarihi boyunca). Tek bir zirkon kristali tek bir kayadan (muhtemelen ilk kristalleştiği volkanik ev sahibinden) aşınarak çıkabilir, sonrasında tortul bir kum taşının parçasına dönüşebilir ve milyarlarca yıl boyunca tekrar tekrar aşınabilir. Bir düzine farklı tortul kaya oluşumu yoluyla aynı zirkon parçasının geri dönüşümü sağlanabilir.

İkincisi, zirkon kristalleri zamanı söyler çünkü hemen, atomlarının yüzde birini ya da daha fazlasını oluşturabilen uranyum elementini kapsamlarına alırlar. Yaklaşık 4,5 milyar yıllık yarı ömrü olan radyoaktif uranyum, doğanın en iyi kronometresidir. Bir zirkon kristali oluştuğunda, uranyum atomları içinde kenetlenir ve düzenli bir oranda bozunmaya başlar; yarısı ortalama 4,5 milyar yılda bir bozunur ve her biri nihayetinde sabit bir kurşun atomuna dönüşür. Küçülen ebeveyn uranyum atomlarının büyüyen kız ürün kurşun atomlarına oranı, zirkon kristalinin yaşına ilişkin doğru bir tahmin sunar.

Son olarak, zirkonun içinde bulunan üç atomdan ikisi oksijendir ve bu da oluşumun ısısına ilişkin ipuçları sunar. Ay'ın oluşumuna ilişkin bir kanıtlar dizisinin oksijenin stabil izotoplarının belirgin oranı olduğunu hatırlayın: Dünya ve Ay'ın, oksijen-16'dan oksijen-18'e oranları aynıdır, bu da Güneş'e benzer uzaklıkta oluştuklarını gösterir. Benzer bir akıl yürütme çizgisinde, bir zirkon kristalinin içinde oksijen-16'nın oksijen-18'e oranı, büyüdüğü

ısıya, Oksijen-18'in yoğun olduğu daha ağır örnekler, daha düşük bir oluşum ısisına işaret eder. Volkanik kayalar için, bu ısı, zirkon kristallerinin içinde büyüdüğü magmanın su içeriğinin duyarlı bir göstergesi olabilir, çünkü su kristallerin büyüdüğü ısıyı azaltır. Dahası, yeryüzünün yüzeyinin yakınlarındaki suyun izotop oranlarında genellikle ağır oksijen daha fazla bulunur, dolayısıyla oldukça yüksek oksijen-18 içerikleri olan zirkon kristallerinin yüzey suyuyla etkileşime geçtiği yorumu yapılmıştır.

Bu şekilde, yeryüzünün ilk kayalarından çıkan zirkon kristalleri, özgün çevrelerinin yaş, ısı ve su içeriği ayrıntılarını korurken pek çok erozyon ve tortulaşma döngüsünü sürdürebilir. Bütün bu bilgiler, mikroskopsuz görmeyi güçleştiren boyuttaki kristallerden elde edilmiştir.

Sözün özü, Avustralya'nın Jack Hills bölgesindeki zirkon kristalleri 4 milyar yaşın üzerindedir ve tek bir yaşlı, antik kum tanesi dikkat çekici biçimde 4,4 milyar yılda devreye girer. Bu en yaşlı zirkon kristalinin (ki gerçekten de yeryüzünün bilinen en yaşlı katı parçasıdır) şaşırtıcı biçimde ağır bir oksijen izotop kompozisyonu vardır. Bazı bilim insanları, Dünya yaklaşık olarak yalnızca 150 milyon yaşındayken, yüzeyin görece soğuk ve ıslak olduğu sonucuna varır, okyanusların var olma sebebi budur.

Diğer uzmanlar o kadar emin değildir. Zirkon kristallerinin inanılmaz derecede karmaşık olabileceğine, 4,4 milyar yaşındaki taneciğin, yanı sıra Jack Hills'den biraz daha genç olan tüm arkadaşlarının antik bir kristal özü olduğuna işaret ederler. Fakat her kristalin ayrıntılı haritalandırması, daha eski katmanların çevresinde gelişen iç içe geçmiş daha genç zirkon katmanlarını açığa çıkarır. Tek bir taneciğin, oksijen izotoplarında uygun biçimde karmaşık değişkenlerle özden çerçeveye bir milyar skalasında yaş ortaya koyması alışılmamış bir durum değildir. Daha yaşlı olan öz, kristal büyümenin daha yakın zamana ait titreşimleri sırasında değişmiş olsaydı Dünya'nın antik yüzeyinin gerçek yapısı anlaşılmaz hâle gelebilirdi.

Zirkon öyküsünün nihai sonucu ne olursa olsun, pek çok uzman, Büyük Darbe'den sonraki yüz milyon yıldan çok uzun olmayan bir süre sonra, yeryüzünün 1,6 kilometre derinliğinde döngüsel bir okyanusu olan parlak mavi bir suya dönüşmüş olduğu konusunda hemfikirdir. Bu, uzaydan, elbette beyaz bulut demetleriyle savrulan fakat büyük oranda nefes kesici bir mavi olan lacivert bir mermer gibi görünürdü. (Okyanusun rengi aynı basit fizikle ortaya çıkar. Yüzeyi yıkayan Güneş ışığı gök kuşağının tüm renklerini -kırmızıları, sarıları, yeşil ve mavileri- içerir fakat su tayfın kırmızı ucunu daha kolayca absorbe eder, dolayısıyla gözlerimiz saçılan mavi ışık dalga boylarının üstünlüğünü algılar.)

Peki ya toprak? Bugün kıtalar yeryüzünün yüzeyinin yaklaşık üçte birini oluşturmaktadır fakat gezegenimizin doğduğu dönemde, cehennemi Hadean Devir'de, kıtalar henüz oluşmamıştı. Primordiyal mavi okyanus ancak dalgaların üzerine saplanan birbirinden ayrı, kızgın volkanik adalarla bölünüyordu. Koni şeklindeki hatları ve yerküreyi kutuplardan Ekvator'a gelişigüzel biçimde işaretleyen dar, moloz yığınınna benzeyen siyah sahilleri, suyun monotonluğunu kıracak yegâne özelliklerdi.

Yeryüzünün ilk, kürenin bütününe yayılan okyanusunu düşündüğümüzde, onun neye benzediğini merak ederiz. Sıcak mıydı? Alttaki hâlâ soğumakta olan magma okyanusunun varlığı düşünüldüğünde başlangıçta belki. Tuzlu muydu yoksa tuzsuz muydu? Tuz modern okyanus suyunun belki de en farklı özelliğidir fakat yeryüzünün ilk okyanusunun, çözünmüş birkaç kimyasalla tuzsuz olduğunu ve ancak kademeli olarak bugünkü tuzlu hâline eriştiğini varsaymak makul olabilir. Buna karşılık, yakın zamana ait kanıtlar, ilksel sıcak okyanusun, hızla bugünkünden çok daha tuzlu hâle geldiğini ortaya koyar. Yaygın sofratuzu, sodyum klorür (NaCl) sıcak suda hemen çözülür. Bugün yeryüzündeki suyun yaklaşık yarısı tuz tümseklerinde ve kurumuş tuzlu su yığınlarıyla ilişkili diğer evaporit çökeltilerde yoğun biçimde bulunur. Bu tuzun büyük bir bölümü kalın katmanlar hâlinde yerin derinliklerinde tutulur fakat yeryüzünün ilk yarım milyar yılı boyunca tuzun saklanacağı hiçbir kıta yoktu. Dolayısıyla, ilk okyanusun tuzluluk oranı modern

dünyadaki iki katı kadar olabilir. Dahası, ılık okyanus suyunda çözülen diğer elementler -temelde demir, magnezyum ve bazalta hâkim olan kalsiyum- da daha yüksek yoğunluklarda bulunacaktı.

Bilim insanları aynı zamanda Hadean okyanusunun asidik mi yoksa bazik mi olduğunu merak eder. Okyanusun pH'ını ve tuzluluk oranını kontrol eden en kritik tek unsur atmosferik karbondioksittir. Eldeki verilerin büyük bölümüne göre, (her sene hızla yaklaştığımız bu düzeyi yakında geçecek olsak da) ilk okyanusun CO_2 içeriği bugünün milyonda dört yüz parçadan biraz daha az olan değerinden binlerce kat yüksekti. Hadean havasında çok daha fazla CO_2 , suyun içinde de çok daha fazla CO_2 olması anlamına geliyordu ve bunun hem pH hem de tuzluluk oranı açısından önemli sonuçları olmuş olmalıydı. Karbondioksit, karbonik asit (H_2CO_3) oluşturmak üzere yağmur suyuyla birleşir. Okyanusta, bu karbonat kısmen hidrojen iyonlarına ayrılır, bunlar da hidronyum iyonlarını (asitlerin H_3O^+ sını) ve bikarbonatı (ya da HCO_3^-) yi oluşturur. Bu net H^+ eki okyanusları daha asidik hâle getirir, muhtemelen 5,5 gibi bir pH'a düşürür. Bu türden asidik okyanus koşulları da muhtemelen bazaltın ve diğer kayaların aşınmasını arttırmış, hâlihazırda tuzlu bir okyanusa daha da fazla çözünen madde eklemiştir.

Solgun Güneş Paradoksu

Sanki yeryüzünün ilk okyanusunun ayrıntılı, bazen çelişkili olan öyküleri yeterince tartışmalı değilmiş gibi, uğraşılacak bir büyük buluş daha vardır: Gittikçe daha duyarlı hâle gelen astronomik gözlemlere ve astrofizik hesaplamalarına göre, Güneş'imiz gibi yıldızlar var oluş süreleri boyunca ağır, acımasız bir parlaklaşma sürecinden geçmektedir. Bu tahminlere göre, 4,4 milyar yıl önce-sinin genç Güneş'i, bugün olduğundan yüzde 25 ila 30 oranında daha az parlaktı. Dahası, Güneş 1,5 milyar yıl daha rahatsız edici biçimde donuk kalacaktı. Bugünün Güneş'i bu aşırı oranda birden kararacak olsaydı Dünya hızla yıkıcı bir buzluk evresine girerdi; okyanuslar kutuplardan Ekvator'a kadar kaskatı donar ve

yeryüzündeki yaşamın büyük bölümü son bulurdu. Bu türden yıkımsal bir iklim değişimi sürecinde, sadece en güçlü organizmalar, yer altının derinliklerindeki mikrobik yaşam ve volkanlarla ilişkili korunaklı hidrotermal bölgelerde yaşayan hayvanlar varlıklarını sürdürebilir.

Bu türden daha soğuk bir Güneş'in varlığında, Dünya hızla donmuş olmalı. Bununla beraber en az dört milyar yıl öncesinde bol miktarda yer üstü suyunun olduğuna ilişkin jeolojik kanıtlar tartışmasız biçimde geçerlidir. Hem sığ hem de derin su çevrelerinden tortulara sıkça rastlanır. Hayat bu ara dönemde başlamış ve gelişmiştir. O hâlde ilk okyanus nasıl sıvı olabilmıştır?

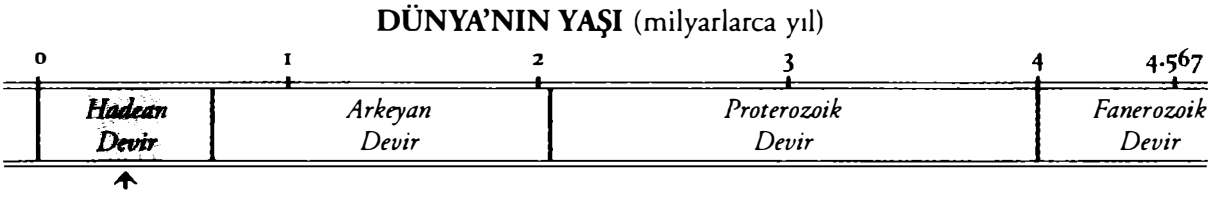
Elbette Güneş'in çok daha sönük olmasının neden olduğu ısı yetersizliğinin bir bölümü yeryüzünün çok daha sıcak oluşuyla telafi edilmişti. İlkel magma okyanusunun kabuklanmasından sonra, hâlâ yüzeyi ıltacak oldukça fazla sayıda sıcak erimiş kaya ve volkanik aktivite vardı. Siyah kabuk ağır ağır kalınlaşıp soğudukça, bu türden bir gezegen üzerindeki bir okyanus sürekli olarak aşağıdan ısıtılacaktı.

Solgun Güneş paradoksunu açıklama yönündeki başat hipotez, karbondioksitin oldukça yüksek (belki mevcut atmosferimizin basıncının on katı yoğunlukta) atmosferik konsantrasyonlarının neden olduğu abartılı bir sera etkisi olduğuna işaret eder (okyanusu asidik hâle getirmiş ve tuzluluk oranını arttırmış olabilecek, aynı yüksek CO₂ konsantrasyonları).

İkinci bir zekice senaryo, yeryüzünün ilk siyah ve sonra mavi evrelerinde, Güneş'in enerjisini bugün yüzeyin yaptığından çok daha yüksek bir oranda sönümlediğini ortaya koyar. Bugün okyanuslar karadan daha fazla Güneş ışığı sönümlemektedir -bu, muhtemelen uzun zaman önce, demirin ilk okyanuslarda yüksek orandaki yoğunlaşmalarıyla artan bir etkidir. Bu artan Güneş soğurumuna ışık saçan bulutların olası bir yokluğu eşlik ediyordu; bugün bitkilerden üretilen parçacıklar ve kimyasallar, bulutların çekirdekletmesinde başat bir rol oynamaktadır fakat bundan milyarlarca yıl önce, bulut oluşumunu tetikleyecek hiçbir bitki yoktu.

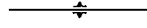
Ancak bir diğer hipotezde atmosferin ilk evrelerinde büyük oranda güçlü sera gazı metan bulunduğu öne sürülür. Metanın yoğun olarak bulunduğu bir atmosferin ilginç sonuçlarından biri, ultraviyole radyasyonun yaşamın olası yapı taşlarının da dâhil olduğu zengin çeşitlilikteki organik moleküllerin sentezini tetiklediği atmosferde yüksek düzeyde kimyasal reaksiyonlar oluşmasıydı. Bu türden organik moleküller kalın, sis benzeri bir pus oluşturabilir, mavi yeryüzünü, Satürn'ün büyük uydusu Titan'dan farklı olmayan, belirgin biçimde turuncu bir dünyaya dönüştürebilirdi. Dolayısıyla henüz unsurların net bileşimi hakkında bilgimiz olmasa da yeryüzünün donma noktasının üzerinde nasıl varlığını sürdürdüğüne ilişkin gereğinden fazla açıklamaya sahibiz.

Bu küresel okyanusun, oluşumuyla, toprağın biçimlendirilmesiyle, gitgide farklılaşan mineral krallığının evrimiyle ve biyosferin kökenleriyle gezegenin en dıştaki katmanlarını oluşturduğunu güvenle söyleyebiliriz. Su, mineral zenginliğinin deriştiricisi, yüzey değişiminin başat öznesi ve tüm yaşam için aracı olarak, yaşamlarımızın her alanında mucizesini hâlâ göstermektedir.



Beşinci Bölüm

Gri Dünya



İlk Granit Kabuk

Dünya'nın Yaşı: 200 ila 500 milyon yıl arası

Dünya bugün bir çelişkiler dünyasıdır -üçte biri karalardan üçte biri sudan oluşmaktadır ve uzaydan bakıldığında mavi, kah-verengi, yeşil ve helezonlaşan beyazın bir karışımıdır. 4,4 milyar yıl önce, siyah bazaltların geniş bir alana yayılmış simetrik volkanik konileri, sığ denizlerin mavi monotonluğunun üzerine saplanacak biricik cılız kuru toprak parçalarıyken durum böyle değildi. Tüm bunlar granitin -kıtaların sağlam temel taşının- keşfiyle değişmek üzereydi.

Dünya'nın öyküsü bir başkalaşım efsanesidir- elementlerin yeni kaya ve minerallere, kıta ve denizlere ve nihayetinde yaşama bölünme ve yoğunlaşma efsanesi. Bu konu tekrar tekrar işlenmiştir. İçteki kayalıklı gezegenler (Merkür, Venüs, Dünya ve Mars) Güneş rüzgârının yoğun titreşimleri, daha hafif gazlı elementleri dışarıya, dev Jüpiter, Satürn, Uranüs ve Neptün gezegenlerinin alanına sürükleyerek hidrojen ve helyumu daha ağır büyük altı elementten ayırdığında oluşmuştur. Yeryüzünde, metal çekirdek, peridotit yönünden zengin mantodan ayrılırken yoğun eriyik demir de merkeze yerleşmiştir. Peridotitin kısmi olarak erimesi, yeryüzünün ilk ince, siyah kabuğunu oluşturmak üzere peridotitten

ayrılan, silikon, kalsiyum ve alüminyumun yoğun miktarda bulunduğu bir kaya olan bazaltı oluşturmuştur. Bazalt patlayarak yüzeye çıkarken, su ve diğer uçucu maddeler de bazalt magmadan ayrılarak ilk okyanusları ve atmosferi oluşturmuştur. Isı güdümlü her adım elementleri ayırmış ve yoğunlaştırmış, her adım gitgide daha çok katmanlı hâle gelen, farklılaşan bir gezegenin oluşumuyla sonuçlanmıştır.

Kıtaların yükselişi yeryüzünün farklılaşmasında bir diğer önemli adımdı. Dış bazalt katmanları soğuyup katılaştıkça, alttaki kısmen erimiş olan manto için kapak benzeri, ısıyı kapana kısıran bir kapak oluşturdular. Aşağıdan yeniden ısınan bazalt, özellikle suyun varlığında, görece düşük ısılarda, 650 derece gibi soğuklarda erimeye başladı. Isı arttıkça bazalt erime yüzdesi de arttı -önce yüzde beş, sonra yüzde on ve nihayetinde yüzde yirmi beş seviyesinde. Peridotit erimenin bir yansıması olarak, sonuçta ortaya çıkan magmanın kompozisyonu ev sahibi bazalt kayadan gözle görülür biçimde farklıydı. En açık olan, bu yeni eriyiğin, bariz biçimde artırılmış sodyum ve potasyum bileşenleriyle de silikonu çok daha yoğun olarak içerdiğiydi. Bu sıcak sıvının içinde, nadir bulunan düzinelerce eser miktarda element (berilyum, lityum, uranyum, zirkon, tantal ve daha pek çoğu) gibi su da yoğunlaşıyordu. Silikonun yoğun olarak bulunduğu bu yeni magma ebeveyn bazaltından çok daha az yoğundu, dolayısıyla kaçınılmaz olarak yüzeye çıkıyor, ilk graniti oluşturunuyordu.

Çoğu granit dört farklı türden oluşan basit bir mineraloji içerir. Net, renksiz kuvars kristallerinde (saf silikonoksit) bol miktarda granit bulunur; katı parçaları yeryüzünün ilk beyaz kumlu sahillerini oluşturacak biçimde aşınır. Biri potasyum, diğeri sodyum açısından zengin olan iki ayrı türdeki feldispat, yeryüzünün ilk granitlerine monoton grimsi-beyaz rengini vermiştir. Her granite, dördüncü, daha koyu, demir içeren bir mineral saçılmıştır -bazen bloklaşmış piroksen, bazen tabakaya benzer mika, bazen de uzayan amfibol. Cilalı bir granit lavabo tezgâhını ya da banyo aparatını bir dahaki görüşünüzde, dört mineralden oluşan bu basit takımı arayın.

Daha nadir görülen elementlerin varlığı sıklıkla ek minerallerin, örneğin zirkonyumu yoğunlaştıran zirkonunun saçılan daha küçük taneciklerinin oluşumuyla sonuçlanır. Son bölümden, Avustalya'nın uzaktaki Jack Hills bölgesinden çıkarılan cevherli kırmızı zirkon kristallerinin 4,4 milyar yıl önceki ilk okyanusun ipuçlarını sunduğunu hatırlayın. Görece serin, nemli koşullarda oluşmuş gibi görünen bu kristaller, aynı zamanda bu ilk evrede granit oluşumunun başlangıcına da işaret edebilir. Yalnızca Jack Hills zirkonları serin ve ıslak kökenin bariz ağır oksijen izotop imzasını taşımaz, 4 milyar yaşındaki birkaç kristal de kuvarsın (granitin icadından önce nadiren üretilen bir mineralin) içeriklerini kapsar. Bazı uzmanlar, bu eski, soğuk, kuvars içeren zirkon kristallerinin, ilk granit kabuğun son kalıntıları olduğunu iddia eder.

Granitin kökeniyle birlikte, yeryüzünün mineral evriminin ilk kez komşu gezegenlerin bazılarında gözle görülür biçimde ayrıldığını görürüz. Granit oluşumu gezegen yüzeyi yakınında bol miktarda bazalt, yanı sıra bu bazaltı yeniden ısıtabilmek için yoğun bir içsel ısı gerektirir. Daha küçük olan Mars ve Merkür gezegenlerinde, yanı sıra Ay'da gerekli olan bazalt maddesi bulunur fakat fazla granit üretmek için çok küçüktürler. Gerekli içsel ısıdan yoksundurlar. Bu gezegenlerde elbette küçük granit hacimleri oluşturulmuştur fakat bu yeryüzünün kökenleri derinlerde olan granit kıtalarına hiçbir şekilde benzemez.

Kaldırma Kuvveti

Yeryüzünün aşağıdan gelen sıcakla ve suyun yaklaşık üç katı kadar tekdüze bir yoğunlukla yumuşayan ilkel siyah bazalt kabuğunun coğrafi yapının oluşumuna pek fazla katkısı olmadı. Birkaç volkanik yapı, ortalamanın birkaç kilometre üzerine, dağınık siyah adaların denizin üzerine çıkmasına yetecek yüksekliğe çıkmış olabilir fakat kıtaların oluşumundan önce ne muhteşem sıradağlar ne de derin okyanus havzaları vardı. Gözle görülür biçimde daha düşük bir ortalama yoğunluğu olan granit (suyun yaklaşık 2.7 katı), bu dinamiği değiştirdi. Granit kaçınılmaz olarak bazalt ve peridotit

üzerinde yüzer; büyük tümsekler şeklinde yükselir ve su üzerinde yüzen bir buz dağı gibi yüzeyin kilometrelerce üzerine çıkar.

Suya göre yaklaşık yüzde on daha az yoğun olan buz, bilindik bir örnek sunar. Bu yoğunluk farklılığından ötürü, bir buz dağı'nın yaklaşık yüzde onluk bölümü suyun dışına doğru çıkıntı yapar. Altmış metre uzunluğunda sivri bir buz dağı'nın tipik olarak dokuz metrelik ya da daha büyük orandaki bölümü (yani “buz dağı'nın görünen kısmı”) su yüzeyi üzerinde kalacaktır. Aynı şekilde, granit üzerinde yüzdüğü bazalttan yüzde on oranında daha az yoğundur. Yeryüzünün kısmen erimiş olan bazalt kabuğu katmanlarca granit ürettikçe, buz dağı benzeri çıkıntılar oluşmaya başlamıştır. 1,6 kilometre kalınlığında bir granit kütlesi, bir bazalt kabuğunun ortalama seviyesinin yaklaşık üç yüz metre üzerine çıkan küçük bir tümsek oluşturabilirdi. Fakat zaman içinde, biriken granit kabuğu kütleleri kilometrelerce kalınlığa erişti; böylece kökleri derinlerde olan kıtasal kara parçaları okyanusların içinden gitgide daha fazla yükseldi ve bazı sıradağlar su yüzeyinin kilometrelerce üzerine çıktı. Altmış beş kilometre derinliğindeki granit kökleriyle, Amerika'nın batısında bulunan bugünün Rocky Dağları zinciri, 4.270 metrenin üzerinde sayısız zirveye sahiptir. Kuzey Amerika kıtasının bu ihtişamlı omurgası granitin kaldırma kuvvetinin bir kanıtıdır.

1970 yılında, Massachusetts Teknoloji Enstitüsü'nde ilk der-simi aldığım da, kaldırma kuvvetinin jeolojik değişimi tetiklemek-teki gücü hâlâ ders kitabı tutuculuğu olarak algılanıyordu. (İn-giliz jeolog Arthur Holmes'un oldukça fazla örnek içeren klasiği *Principles of Physical Geology*'nin 1965 yılı basımından yarar-landık.) “İzostasi” diye adlandırılıyordu. “Dikey tektoniğin” ar-dındaki itici güç “izostatik yeniden düzenleme”ydi. Gerçekten on dokuzuncu yüzyıl jeoloji metinlerinde görülenden farklı olmayan düzgün bir tahta baskı kalıbı, suda yüzen farklı boylarda dikdört-gen şeklinde tahta kalıplar dizisini gösteriyordu. Daha uzun kalıp-lar, tıpkı bir dağ gibi suyun daha fazla üzerinde görünüyordu. Ok-yanus havzalarının nasıl kalın tortu katmanlarıyla dolduğunu ve bu katmanların daha fazla granit kalıp oluşturacak biçimde nasıl

erimiş olduğunu öğrendik. Dağların sonunda su yüzeyinde kalan o granitik özlerden nasıl yükseldiğini öğrendik. Bunların tümü o dönemde oldukça anlamlı görünüyordu ve hâlâ, yeryüzünün ilk kabuğunun dört milyar yıldan uzun bir zaman önce nasıl oluştuğuna ilişkin başat hipotezdir.

Dünya tarihinin ilk evrelerinde, hatta belki ilk iki yüz milyon yıl içinde, derin bazalt birikintileri kısmen eridikçe, sıcak noktalar üzerinde yüzebilir gri granitlerden gösterişsiz kıtalar oluşmaya başlamış olmalı. Bu ilk zamanlarda, tıpkı Arthur Holmes'un düşündüğü gibi, dikey tektonik ve izostasi varlığını sürdürüyor olmalı. Bu ilk ayrı kıtasal granit parçaları oldukça verimsizdi ve şiddetli dalgalarla savrulmuş ve hırpalanmıştı. Aşınmış kuvars kaya parçaları yavaş yavaş birikerek verimsiz kumlu sahiller oluştururken feldispatlar kilin yoğun olduğu ince topraklara karşı direniyordu. İlk granit adaları ıssız, ortalama boyutta ve düşük profilliydi; gelecek kıtaların skalasına ilişkin hiçbir ipucu vermiyorlardı.

Etkinin Canlandırılması?

O hâlde yeryüzü, ilk evrelerinde nasıl volkan noktalı bazalt bir dünyadan geniş, gri granit kıtaların olduğu bir gezegene geçiş yaptı? İlk birkaç ıssız granit adası nasıl bugün gördüğümüz yarı küreye yayılan kıtalara dönüştü? Jeologlar hipotez geliştirme konusunda hiçbir zaman utangaç olmamıştır. Görece ilginç fikirlerden birinde, o bilindik şans etkeniyle tetiklenen kıta oluşturan bir dizilim ortaya konulur: Arındırıcı asteroid.

Theia'nın yok olmasını ve Ay'ın oluşumunu izleyen bir milyar yıl içinde, zaman zaman büyük darbeler olmuştur. Bu tartışmasızdır. Uzmanlar yüz altmış kilometreye kadar düzinelerce büyük asteroidin (özgün gezegen oluşturan dönemin gezgin kalıntılarının) biçimlendirici dönemlerinde yeryüzüyle çarpışmış olması gerektiğini düşünüyor. Dört milyar yıl öncesine ait, sıcak bir yumuşamış kaya gayzerinin genç bir okyanus kabuğunun altına yükseldiği bir senaryoyu hayal edin. Buna benzer yüzlerce değilse de düzinelerce gayzer, iç ısıyı etkili ısıyayım süreciyle aktarmak için

yeryüzünün derinliklerinden yükselmiş olmalı. Bazalt kabuğun yeniden erimesi toprağı kalınlaştıran granit bir bileşen oluştururken bile, bazalt lavlar püskürten büyük volkanlar her gayzerin üzerinden fışkırmıştır.

Sonra felaket yaşanır: Elli kilometre çapında bir asteroid volkanik kümeye çarparak dört yüz seksen kilometrelik bir yarıçaptaki her kara izini yok eder. Darbe yakındaki yüzeyi yapışkan eriyik lav ve parçalanmış kaya parçaları sağanağı altında bırakırken, kâse şeklinde dev bir magma gölü oluşturur. Bu kozmik hasar yüzeye çıkmanın yeni bir yolunu bulması gereken manto gayzerinin önünü keser.

Bu zekice senaryoya göre, darbe sonrası gayzeri aşağıda bazalt kayalar ve büyüyen granit bir örtüyle mini bir kıtayı harlatmak üzere yolunu değiştirir. Bu türden kalın, ısıyı hapseden bir bazalt örtüsünün altında konumlandırıldığında, yeni ısı kaynağı yeni granit titreşimlerini çokça üretir ve böylelikle karayı genişletir ve kalınlaştırır.

Test edilemeyen bu öykü muhtemelen yeryüzünün ilk kara oluşum anlatısının bir parçasıdır. Asteroid çarpışmalarıyla gelişen bir milyar yıllık tektonizma, karışan bazalt ve granit özleriyle gitgide artan bir volkanik okyanus adaları envanteri oluşturacaktı. Kara yavaş yavaş denizin içinden yükseldi. Dört milyar yıl kadar önce, yerküre çevresine gelişigüzel biçimde dağılan geniş adalar, Dünya yüzeyinin makul bir oranını kaplamış olabilir.

Fakat sonra levha tektoniğı oluştu ve yeryüzünün yüzeye yakın evrimi hızlanmaya başladı.

Sürüklenen Kıtalar

Yeryüzünün baskın jeolojik süreci olarak levha tektoniğinin keşfi, kendi başına modern bilimin büyük bölümünü kapsayan bir öyküdür. En az dört yüz yıllık gözlemlerde öngörölmüş olmasına karşın, bütün olarak kıtaların bir şekilde yeryüzünde göç edebildiğı fikri başlangıçta belirsiz ve inanışlara aykırıydı ancak 1960'lardaki keşiflerin uluslararası boyuttaki şiddetli akınıyla dikkat çekmeye

başladı. Fakat kanıtlar yığını birikmeye başladığında, Dünya bilimlari, bilim tarihindeki en hızlı paradigma kaymalarından birini deneyimledi. Gerçekten de 1970'lerin ortalarında Massachusetts Teknoloji Enstitüsü'ndeki beş yıllık lisans dönemim boyunca, dikey tektonizmaya ilişkin eski inanışlar neredeyse silindiğinden tüm jeoloji ders kitaplarının bütünüyle yeniden yazılması gerekti.

Geçmişe bakıldığında, dikey tektonizmaya karşı kanıtlardan bazılarının açık olmuş olması gerekirdi. Rocky Dağları bugün dimdik dursa da Everest Dağı'nın ve güçlü Himalaya Sıradağlarının on bir kilometrelik yüksekliği karşısında küçük görünürler. Benzer şekilde, okyanusların ortalama 3,2 kilometrelik derinliğine karşılık, yeryüzünün Güney Pasifik'teki Mariana Adaları'nda konumlanan en derin okyanus çukuru, inanılmaz biçimde on bir kilometreye kadar iner. Bu türden topoğrafik uçların izostatik bir dünyada sürdürülmesi mümkün olmazdı. Dikey tektonizma öykünün tamamını oluşturamaz.

Yanal tektoniğin incelikli ipuçları (yanlamasına hareketlerin yeryüzünün jeolojik evrimindeki rolü), Yeni Dünya'nın kıyı şeridinin ilk doğru haritalarıyla birlikte ortaya çıkmıştır. 1600'lü yılların başlarında, Amerika'nın doğu kıyı şeridiyle Avrupa ve Afrika'nın batı kıyıları arasındaki çarpıcı benzerlik açıkça görülebiliyordu. Aynı kavisli biçim, aynı koy ve tümsekler, Afrika'nın güneybatı ucunun yuvarlak çizgileri ve Güney Amerika'nın uç noktasının bununla uyumlu biçimde doğuya doğru kıvrılışı -bunların tümü antik yapboz benzeri bir tür uyuma işaret ediyordu.

Pek çok tuhaf hipotezde, Atlantik aşırı kıtasal uyum, nafile bir çabayla açıklanmaya çalışılıyordu. Harvard Üniversitesi'nden, George Darwin'in (hızla dönen bir dünyadan uzaya fırlatılan erimiş bir damla olarak) Ay'ın fisyon kökeni kuramını destekleyen astronom William Henry Pickering, Ay'ın Pasifik Okyanusu'ndan koparılışıyla aynı anda, yeryüzünün zıt köşesinde Atlantik Okyanusu'nun açıldığını ortaya koydu. Diğerleri Tanrı'nın elini büyük Atlantik'te gördü. Belki de Atlantik kıyıları, birkaç bin yıl önce büyük okyanusu yaratmak ve "karaları bölmek" için başlatılan Nuh'un güçlü tufanının bir sonucuydu.

Sistematiik jeolojik araştırmalar sorunun cevaplanmasına yardımcı olmuş olabilir fakat bundan dört yüz yıl önce, jeoloji, sistematiik olan herhangi bir biçimde izlenmek bir yana, adlandırılmamıştı bile. Madencilik ve tarım, on sekizinci yüzyılın ilk jeolojik araştırmalarının ardındaki güdüleyici ekonomik güçler, mutlak biçimde devlet ve ulus işleriydi. Politik sınırlarda jeolojik oluşumları eşleştirmek için çok az çaba harcanıyordu; tek bir bölgenin zenginlikleri de tutarlı herhangi bir biçimde diğerkleriyle ilişkili görülmüyordu. Altın, oldukça abartısız biçimde onu bulduğunuz yerdeydi. Bu türden milliyetçi bir haritalandırma çevresinde, Atlantik Okyanusu'nun geniş alanında jeolojik özellikleri örtüştürmenin bir öncelik olduğunu söylemek pek mümkün değildi.

İlk ayrıntılı Atlantik aşırı jeolojik karşılaştırmaları beklenmedik bir bilim insanı, kariyerinin büyük bir bölümünde Kuzey Kutbu'nda olan havabilimci Alfred Wegener gerçekleştirmişti. (Elli yaşındayken, Grönland'daki buz tabakaları üzerinde, kış mevsiminde gerçekleşen bir kurtarma görevi sırasında öldü.) Profesyonel yaşamı öncelikle havanın kökenlerinin araştırılmasına adanmış olmasına karşın, en unutulmaz ve kalıcı çalışması “kıtasal sürüklenme” diye adlandırdığı, yanal tektonik hareketlere erken dönemde gerçekleşen ve oldukça hafife alınan bir katkıyla ilişkiliydi. Bu tuhaf jeolojik sapmanın esin kaynağı, Birinci Dünya Savaşı sırasında, Alman Ordusu'nda yedek teğmen olarak görev yaptığı dönemde oluştu. Belçika harekâtı sırasında boynundan vurulan Wegener, cephe hattındaki görevinden alınmış ve iyileşme döneminde tüm zamanını çalışmaya ayırmasına izin verilmişti.

Pek çok bilim insanı eşleşmeyi bir tesadüf olarak görerek ciddiye almamış olsa da Wegener de pek çok önceli gibi kıtaların Atlantik Okyanusu'ndaki gözle görülür uyumu karşısında çarpılmıştı. Wegener daha geniş bir açıdan baktı ve benzer uyumların Doğu Afrika'nın, Antarktika'nın, Hindistan'ın ve Avustralya'nın farklı kıyılarında görülebildiğini fark etti. Gerçekten de yeryüzünün tüm kıtaları, (Yunanca “tüm topraklar”dan esinle) Pangea diye adlandırdığı tek bir süper kıta oluşturmak üzere görkemli biçimde birleştirilebilirdi. Wegener ve onun gibi düşünen bir avuç destekçisi

aynı zamanda Avrupa, Afrika ve Güney ve Kuzey Amerika'nın kıyı kesimleri üzerinde yakın zamanda yapılan jeolojik araştırmalardan kanıtları alıntılanmıştır; bunlar, engin Atlantik'teki cazip ilişkileri açığa çıkaran eserlerdir. Brezilya ve Güney Afrika'nın geniş çaptaki altın ve elmas rezervleri gibi büyük madencilik bölgeleri, kıtalar yan yana getirildiğinde tek bir büyük çökelti gibi görünür. Benzer şekilde, ilginç fosil eğrelti otu *Glossopteris*'i ve soyu tükenen sürüngen *Mesosaurus*'u içeren kaya katmanları neredeyse aynı şekilde sıraya dizilir. Bu türden ayrıntılı jeolojik ve paleontolojik ilişkilerin salt tesadüf olamayacağını iddia ediyordu.

Wegener'in kıtasal kayma hipotezi, 1915 yılında yayınlandı. Her biri bir öncekinden daha ayrıntılı üç Almanca baskı birbiri ardına yayınlandı; bunu kitabın 1924 yılında yayınlanan *The Origins of the Continents and Oceans* başlıklı İngilizce çevirisi ve başka pek çok basım izledi. Kıtaların bir zamanlar birleşik olduğu fikrini destekleyecek pek çok yeni veri ortaya konuldu. 1917 yılında, paleontologlardan oluşan bir komite, okyanuslarda birleşen bir düzineden fazla fosil içeren özel katmanı listeledi -bunlar bir tür antik kara köprüsü gerektirdiği yorumunu yaptıkları verilerdi. Wegener'in fikirlerine özel bir hayranlık duyan Güney Afrikalı jeolog James Du Toit, Güney Amerika'nın doğusunu görmek için Carnegie Enstitüsü'nden bir burs aldı. Burada daha fazla okyanus aşırı eşleşme örneğini kayda geçirdi: Birbirinin aynı minerallerin, kaya ve fosillerin çarpıcı örnekleri.

Ancak kıtasal hizalanmaya ilişkin verilerin birikmesine karşın, Dünya bilim topluluğu etkilenmemişti. Kıta çapında gezintiler için inandırıcı bir mekanizmadan yoksun olan pek çok jeolog, Wegener'in varsayımlarını açıkça küçümsüyordu. Bu eleştirilerinde, Newton'un, büyük kıtaların yerkürede onları harekete geçirecek buna bağlı epik bir güç olmadan gezinemeyeceğini dikte eden devinim yasalarıyla destekleniyorlardı. Küresel çapta bir güce başvurulana kadar, kıtasal kayma jeolojik bir amatörün ilginç bir fikrinden biraz daha fazlası olarak görülecekti. Cambridge'li fizikçi Harold Jeffreys, 1923 yılında İngiliz bakış açısını özetledi: "Wegener'in sunduğu fiziksel nedenler gülünç biçimde yetersiz." Amerika'daki jeologlar

da aynı şekilde ikna olmamıştı. Chicago Üniversitesi jeoloji bölümünden Rollin T. Chamberlin, 1926 yılındaki bir sempozyumda kıtasal kaymayı geçersiz kıldı: “Wegener’in hipotezi, yerküremize gözle görülür biçimde saygısızlık etmesi bağlamında serbest türdedir ve pek çok rakip kuramına göre, sınırlamalara daha az bağımlı ya da çirkin gerçeklere daha az bağlıdır. Wegener’in hipotezine inanacak olursak geride bıraktığımız 70 yıl içinde öğrenilen her şeyi unutmamız ve baştan başlamamız gerekir.”

Bununla beraber, birkaç jeolog, Wegener ve onun destekçilerinin bulgularını kıtasal kaymalar için yeni mekanizmalar geliştirecek kadar ilginç bulmuştu. Düşünce okullarından biri, yeryüzünün muhtemelen soğuma ya da derin iç bölgelerdeki gazla doldurulan boşlukların çöküşü yoluyla küçüldüğünü, dolayısıyla yüzeyin parçalarının kırılan bir kemerli geçit gibi kademeli olarak içe doğru düşmesi gerektiğini iddia ediyordu. Bu savunulamaz modelde, kıtalar bir zamanlar Amerikaların batı sahillerinden Afrika ve Asya’nın doğu sahillerine kadar uzanacak biçimde sürekli karalarını genişletiyordu. Bugünün Atlantik Okyanusu, mantoya gömülen dev bir kara geçidi olarak görülüyordu. Temel Öklid geometrisi bu küçülen Dünya modelini bozdu: Basit bir geçit çökebilir fakat bu fikri bir küreye aktardığınızda Atlantik Okyanusu alanını kaplayan kıtasal bir hacmin herhangi bir şeyin içine çökmesi hiçbir şekilde mümkün değildir.

Bir diğer grup, yeryüzünün genişlediği, jeolojik zaman üzerinde bir balon gibi şiştiği yönündeki karşıt görüşü ortaya koydu. Bir zamanlar yalnızca (bazı anlatımlara göre derin, sıcak, genişleyen gazların neslinden) gezegen şiştikçe yarılan ve ayrılan kıtasal kabuk vardı. Gerçekten de genişlediği varsayılan yeryüzünün hayali bir videokasetini geriye doğru izleyecek olursanız tüm kıtaların modern dünyanın çapının yaklaşık beşte üçlük bir kısmı olan bir alanı kaplayacak biçimde düzgünce yan yana durduğu bir duruma erişebilirsiniz. Atlantik için kapsamlı olarak kabul edilen başka herhangi bir bilgi mekanizmasından yoksun olan bu hipotez, 1920’lerden, ikna edici yeni bir fikrin hayata geçirildiği 1960’lara kadar bazı jeolojik çevrelerde varlığını sürdürmüştür.

Gizli Dağlar

Şimdi İkinci Dünya Savaşı'nı izleyen, olağanüstü teknolojik yeniliklerin ve bilimde iyimserliğin çağına hızla geçiş yapıyoruz. Denizaltı savunma harbindeki, her ikisi de 1950'lerde yaşayan denizbilimcilerin gizliliğini kaldırdığı ve benimsediği iki gelişme, dinamik yeryüzüne ilişkin dönüştürücü keşiflerle sonuçlandı.

Uzaklık ve yönü ölçmek için ses dalgalarını kullanan deniz radarı, Hollywood denizaltı filmlerini izlemiş olan herkesin aşına olduğu yüz yıllık bir teknolojidir. Bir ses duyarsınız ve bu ses kısa bir süre sonra daha yumuşak, yankılanan bir sesle cevaplanır. Bir ses dalgası, bir denizaltının sert gövdesinden sekti. (İzleyici üzerindeki etki, filmin bakış açısının avcı mı avlanan mı olduğuna bağlıdır.) “DONG... *dong*,” “DONG... *dong*,” “DONG... *dong*”: Denizaltının yeri belirlendiğinde yankılar daha da hızlı biçimde gelir. Yoğun müzik oluşur; su altı bombaları bırakılır.

Tam olarak aynı teknoloji, okyanus derinliği, dolayısıyla okyanus zemini topografyası üzerinde çalışma amacıyla bilimsel olarak kullanılabilir. En derin okyanus vadileri ve çukurlar bile ses dalgalarıyla ölçülebilir. Henüz 1870'lerde, İngiliz bilim insanları HMS *Challenger* içinde işlenmemiş derin su sondajları uyguladı ve Orta Atlantik'in zemini üzerindeki dev dağların ipuçlarını verdi; bu, bazı çağdaş romantiklerin kayıp Atlantis kıtasıyla ilişkilendirdiği, cazip bir sonuçtu. İlk kez 1912 *Titanic* felaketinden sonra, buz dağı tespiti için geliştirilen ilkel eko-ses teknolojisi, Birinci Dünya Savaşı sırasında, Alman denizaltıları gezinmeye başladığında hızlı biçimde gelişti. 1920'lerde, deniz radarı okyanus zemininin haritalandırılmasında ilk kez sistematik olarak uygulandı ve büyük dağ sıralarının yeryüzünün bütün okyanusları altında gizlendiği hızla anlaşıldı. Ancak bu öncü okyanus araştırmalarının jeolojik sonuçları pek fazla dikkate alınmadı ve denizbilimsel çabalar büyük oranda Büyük Buhran ve yaklaşan İkinci Dünya Savaşı'yla gölgelendi.

Denizbilimciler savaştan sonra, yalnızca tüm okyanus zemininin topografyasını haritalandırma değil, daha derin kaya

katmanlarından yansıyan ses dalgalarını tespit etme özelliği de olan yeni nesil yüksek duyarlıklı deniz radarlarına sahipti. Atlantik Okyanusu zeminin genel özellikleri kolaylıkla doğrulanmıştır. Örneğin, siz Atlantik kıyılarının büyük bölümünden, yüzlerce kilometreye ulaşan mesafelere kadar uzaklaştıkça, kıta sahanlıkları da kademeli olarak derinleşir. Bu kıta sahanlıklarının karakteristik özelliği uç noktaları 3,2 kilometre derinliğinde ve bin altı yüz kilometre genişliğinde bir deniz tabanı düzlüğüne ani bir düşüştür -bu, kurak alanda hepsinden çok daha geniş ve düz bir özelliktir. Okyanus da kapsamlı bir dağ skalasıyla, Orta Atlantik Tepesi'yle bölünür.

Bunların tümü daha önceki keşiflerle tutarlıydı. Ancak okyanus kabuğunun kalınlığı oldukça büyük bir sürpriz oldu. Jeologlar okyanusların diplerinin karaya göre daha az derinde olacağını, okyanus kabuğunun kademeli olarak kıyıdan uzaklaştığını öngörmüştü. Buldukları şey, bu kademeli dönüşüm yerine, kalınla ince arasında gözle görülür bir zıtlıktı. Kıtaların altında bulunan onlarca kilometrelik kabuksal kayalardan farklı olarak, okyanus kabuğu yalnızca yaklaşık 8 ya da 9,5 kilometre kalınlığındaydı: Keskin geçiş, kıta sahanlığının ucunda, tam olarak düşüş noktasında gerçekleşiyordu. Kıtalar ve okyanuslar arasında bu türden dar bir çizgi, izostatik modellerle tutarlı değildi.

Bilim insanları, her sene yüzlerce kez engin okyanusu aştı. Her geçiş, aynı sonucu veriyordu. Yeryüzündeki en geniş sıradağları oluşturan otuz iki bin kilometrenin üzerindeki sıradağlar, dalgaların altında yer alıyor, Atlantik'i mutlak biçimde ikiye bölüyordu. Kıtasal kıyıların aynı kapsamlı kıvrımları gizli Orta Atlantik Tepesi zirvesinde taklit ediliyordu. Dahası, kıtaların uç noktaları (hareketli kumlu kıyıya zıt biçimde) deniz tabanı düzlüğüne keskin su altı düşüşü olarak görülecek olursa kıtalar arasındaki uyumun da anlaşılmasa olduğu söylenebilirdi, sanki kırılmış bir seramik tabak düzgün biçimde yeniden birleştirilmiş gibi. Bilim artık kıyı çizgilerinin uyumunu salt tesadüf olarak değerlendiremezdi.

Bilim insanları Atlantik'te daha fazla travers tamamlayıp daha fazla ayrıntıyı karşılaştırdıkça, yeni şablonlar ortaya çıktı. Orta

Atlantik Tepesi sıradan bir dağ silsilesi değildi. Karada, dağ sıralarının büyük bir bölümünün eğrilerinden aşağıya doğru en yüksek zirve çizgileri vardır fakat Orta Atlantik Tepesi'nin merkezinde, yaklaşık otuz kilometre genişliğinde ve doğu ya da batıya uzanan yakındaki tepelerden 1,6 kilometre daha derin bir boğaz yapısı vardı -bu, bugün rift vadisi diye adlandırdığımız bir özelliktir. Dahası, tepe ve rift vadisinin kuzeyden güneye uzanan yumuşak ve sürekli bir kıvrımı yoktur. Rift vadisi daha ziyade sürekli dengede idi, doğuya ya da batıya doğru yüz altmış kilometre uzanıyordu, kabuğun kırıldığı ve yerinin değiştirildiği, tepenin bütününe dik ve kırık bir görüntü veren mutlak biçimde tanımlı transform fayları vardı. Neler oluyordu?

Bu türden tetikleyici bulgular, kolaylıkla savaş sonrasının parlak bilimsel keşiflerinin çığı altında kalabilirdi. Bir anlamda, yalnızca daha fazla veriyi temsil ediyorlardı. Fakat okyanus zemini projesindeki başat araştırmacılar sıradan gazeteciler değildi. Kolombiya Üniversitesi Lamont Jeolojik Gözlemevi'nde deniz jeofizikçileri olan Bruce Heezen ve Marie Tharp, yeryüzünün yüzeyinin yeni, dramatik bir topoğrafya haritasını tasarladılar. Diğer topoğrafik haritalarda olduğu gibi kıtasal yükseltileri renklerle yansıttılar -yeşillerden sarılara ve kahverengilere uzanan daha yüksekler ve nihayetinde en yüksek, karlarla kaplı dağ yükseltilerinde beyaz. Himalayalar, And Dağları ve Alpler gibi büyük sıradağlar net biçimde öne çıkıyordu. Heezen ve Tharp'ın sanatsal yeniliği, sıradağların geniş yüzey altını, mavinin değişen gölge ve tonlarıyla da olsa tam olarak aynı şekilde vurgulamaktı; bu, Orta Atlantik Tepesi'nin ve diğer derin deniz özelliklerinin küresel boyutta anıtsal olarak öne çıkmasına yol açan bir teknikti. Muhteşem haritalarını Atlantik'e odaklayarak da kıyı şeritlerinin ve tepenin birbirinin aynı şekillerini şaşmaz biçimde vurguluyorlardı. 1960'lara gelindiğinde, Heezen ve Tharp'ın haritası ikonik bir statü elde etmişti. Bu paralelliğin nedeni ne olursa olsun, bir genetik bağ olduğu gerçeği herkes için açıktı.

(Bruce Heezen'in "HAY-zen" şeklinde telaffuz ediliyor ve geniş çapta övgü alan katkısının benim için ve kariyerim için özel bir

anlamı var çünkü 1966 yılının sonbaharında MIT'e geldiğimde, en kıdemli jeoloji bölümü üyelerinin bile elimi sıkacak kadar saygılı ve istekli olduklarını görmek beni şaşırtmıştı. Hatalı bir sesteş çeşitlilikte de olsa saygın nesiller bilimde her zaman avantajlıdır.)

Genişleyen Deniz

Orta Atlantik Tepesi'nin ortaya çıkması ve Doğu Pasifik ve Hint Okyanuslarında benzer yüzey altı volkanik yükseltilerin keşfiyle birlikte, bilim insanları yanal kıtasal hareket olasılığını yeni bir yoğunlukla ele almaya başladı. Elbette kıtalar, Wegener'in ifadesinin gösterebileceği gibi amaçsızca sürüklenmemektedir, dolayısıyla jeologlar Dünya'nın yüzeyini dramatik biçimde yeniden şekillendirebilecek gizli bir güç aramıştır.

Uzmanları şaşkına çeviren yeni veriler gelmeyi sürdürdükçe yeni keşifler yapılmıştır. Heezen ve Lamont patronu, sismolog Maurice Ewing, 1956 yılında, Orta Atlantik Tepesi'ndeki merkezi rift vadisinin konumuyla yerkürenin çevresine yayılan 55.000 kilometre uzunluğundaki ortalama okyanus tabanı depremleri arasında kayda değer bir ilişki olduğunu belgelemiştir. Rift vadileri ve depremler bir şekilde ilişkilidir, dolayısıyla tepelerin dinamik, değişebilen özellikleri olması gerekir.

Okyanus zemini kayaları aynı zamanda Orta Atlantik Tepesi'nin, tıpkı Kanada'daki Rocky Dağları gibi, dirençli deniz kireç taşlarıyla kaplı tipik sıradağlar olduğunu öngören pek çok jeologu da şaşırtmıştır. Fakat tepe boyunca, Atlantik'teki pek çok adanın gözlemlerine eşlik eden kapsamlı tarama, bazalt dışında hiçbir şey ortaya çıkarmamıştır ve bu da görece genç bir bazalttır. Yumuşak tortuların bir örtüsü dışında, okyanus kabuğunun neredeyse bütünüyle volkanik bazalttan oluştuğu ortaya çıkar. Doğudan batıya, 4.023 kilometreden daha geniş bir alanı kaplayan bazalt, okyanus zeminini oluşturur.

Dahası, radyoaktif elementlerin düzenli azalım hızları üzerine kurulu olan dikkatli tarihlendirme, bu kayaların yaşlarına ilişkin basit bir şablonu ortaya koyar. Orta Atlantik Tepesi'nin merkezindeki

rift vadisinden toplanan bazalt yeni çıkmıştır, yaşı bir milyondan fazla değildir. Rift vadisinden doğuya ya da batıya doğru uzaklaştıkça, bazalt yaşlanır, ta ki kıtasal sınırların yakınlarında bulunan yaşı yüz milyonun üzerindeki kayalara erişilene kadar. Neden eteklerdeki kayalar çok daha yaşlıyken okyanusun merkezindeki kayalar gençtir? Mantıklı sonuçlardan biri, Orta Atlantik Tepe-si'nin yeni bir bazalt kabuğu püskürten bir volkanlar dizilimi olduğudur. Fakat okyanus zemininin uçlarındaki çok daha yaşlı kayalar nereden gelmiştir?

Temel veri, levha tektoniğinin açık delili, mıknatıs ölçer denilen ikinci bir denizaltı avlanma teknolojisinden gelmiştir. İkinci Dünya Savaşı denizaltıları, demirin yoğun olduğu büyük alaşım parçalarıdır, dolayısıyla manyetiklerdir. Mıknatıs ölçerlerin ortaya çıkması sayesinde, denizaltı avlanma uçakları okyanus yüzeyi üzerinde uçabilmiş ve yakındaki düşman denizaltının manyetik anomalisini fark edebilmiştir. Büyük çatışmanın ardından, jeofizikçiler manyetik alandaki küçük değişikliklere karşı duyarlılık seviyesi oldukça yükseltilmiş yeni mıknatıs ölçer türleri icat etmiştir. Bu araçları, deniz dibinin hemen üzerinde araştırma gemilerinin arkasında çekilecek biçimde uyarlamışlardır.

Hedefleri, demir mineral manyetitın küçük kristalleri şeklindeki zayıf manyetik sinyal içeren okyanus zemini bazaltıydı. Yeryüzünün manyetik alanının, seküler değişim olarak adlandırılan biçimde her yıl yavaş yavaş değiştiği bilinmektedir. Bazalt magma soğudukça bu kristaller yeryüzünün manyetik alanı yönünde küçük pusula ibreleri gibi donar. Dolayısıyla okyanus zemini bazaltı, yeryüzünün manyetik alanının yönelimini, tam olarak kayanın sertleştiği tarihte korur. Gelişen paleomanyetizma alanı, bazalt ve diğer kayaların içine hapsedilen bu görünmez manyetik güç alanlarını inceler. (Kuru topraktaki manyetik sinyallerin karmaşasıyla, zaman içinde kıtasal kabuğun katlanmasının, faylanması ve diğer jeolojik bükülmelerin sonucunda, bu türden şablonlar karışır.)

Okyanusbilimciler 1950'lerin başlarından itibaren deniz zeminine yakın mıknatıs ölçerler kullanmış, bunları okyanus tepeleri boyunca uzun kesitlerde taramışlardır. Paleomanyetik ölçümlerinin,

okyanus zemininde seküler değişimin daha iyi bir resmiyle sonuçlanabileceğini ummuşlardır. Bunun yerine buldukları, çarpıcı biçimde düzenli ve girift, tuhaf bir manyetik şablon olmuştur. Hem Atlantik hem de Pasifik'teki merkezi rift vadisine yakın olan bazalt, normal bir manyetik yönelim göstermiş, tam olarak modern kuzey manyetik kutbunun olduğu yönü işaret etmiştir. Fakat rift vadisinin kilometrelerce doğu ya da batısında, manyetik sinyal tam 180 dereceye çıkar: Kuzey manyetik kutbu neredeyse tam olarak mevcut konumunun zıt noktasında, Güney Kutbu'nun olması gerektiği yerdedir ve bunun tam tersi de geçerlidir. Her iki yönde de birkaç kilometre daha yolculuk yaptığınızda, manyetik alan, doğru yönelimle yine 180 dereceyi gösterir. Tekrar tekrar, düzinelere kez, verili herhangi bir kesitteki kayalarda donan manyetik alanın ters döndüğü gözlemlenir.

Yeni analizler üç temel gerçeği açığa çıkarmıştır. Öncelikle bozulmuş manyetik alanları olan kayalar, hem Atlantik'teki hem de Pasifik Okyanusu'ndaki tepelerle tam bir paralellik oluşturan dar, kuzey-güney meyilli topluluklar oluşturur. Merkezdeki rift vadisinin kırıldığı, transform faylarla dengelendiği noktada, manyetik topluluklar için de aynı şey geçerlidir. İkincisi, bu manyetik şeritlerin şablonu, tepe eksenlerinde simetriktir: Merkezden doğuya ya da batıya doğru yelken açtığınızda, bazıları daha geniş, bazıları daha dar olan, tam olarak aynı dizilimde normal ve ters şeritler görülür. Üçüncü olarak da dünya çapındaki tepe sistemlerinden bazaltların bu radyometrik tarihlendirmesi, her evrilmenin aynı anda, dar ve mutlak biçimde tanımlanmış bir çağda gerçekleştiğini doğrular. Dolayısıyla manyetik evirtimler bir tür okyanus zemi kronolojisi işlevi görür.

Bunu akıl almaz olmakla beraber, mantıklı olan iki sonuç izlemiştir. Öncelikle yeryüzünün manyetik alanı vahşice değişkendir: Yarım milyon yılda bir, ortalama 180 derece değişir ve en az son 150 milyon yıldan bu yana aynı şey olmaktadır. Bu kararsız alanın nedenleri bugün biraz ayrıntılı biçimde anlaşılmıştır. Gezegelimiz dev bir elektromanyetik alandır; manyetik alanı yeryüzünün ısı yayan sıvı dış çekirdeğindeki türbülanslı elektrik akımlarından

yükselir. Isı bu çevirimi yönetir; iç çekirdek sınırındaki yoğun sıcak sıvı genişler ve yükselir ve yerini, yukarıdan çöken daha soğuk, daha yoğun bir sıvıya bırakır. Jeofizikçiler, yeryüzünün dönüşünün çevirime karmaşık, kaotik kıvrımlar (yaklaşık olarak yarım milyon yılda bir, manyetik alanda bir değişimle sonuçlanan hareketler) eklediğini göstermek için ileri teknoloji bilgisayar modelleri kullanır. Yeryüzünün dönüşü aynı zamanda manyetik kutupları zamanlarının büyük bölümünü sabit dönüş eksenine yakın bir noktada hizalanarak geçirecekleri biçimde sınırlar fakat çekirdeğin istikrarsızlaştığı dönemlerde manyetik alan geniş çapta uzaklaşabilir ve muhtemelen yüz yıllık ya da daha kısa dönemler için yön değiştirebilir.

İkinci sonuç, okyanusun ortasındaki tepelerin her yıl 2,5 santimetre ya da daha büyük oranda yeni bazalt kabuğu üretmesidir. Daha eski olan bazalt, yerini yeni lav aldıkça, her iki yöne, hem doğuya hem de batıya doğru hareket eder. Dolayısıyla tepe sistemleri, yeni okyanus zeminini püskürten çift yönlü taşıma kayışlarıdır. Orta Atlantik Tepesi'nde oluşan taze bazalt, her yıl beş santimetre kadar büyüyen Atlantik'i genişletir; yeni okyanus zemininde her kilometrenin karşılığı kabaca otuz bin yıldır. Kaseti 150 milyon yıl kadar geriye sardığınızda, Atlantik yoktur. Bu dönemden önce, tıpkı Alfred Wegener'in ileri sürdüğü gibi, Kuzey ve Güney Amerika, Avrupa ve Afrika'yla birleşmiş olmalı.

Bu önemli keşfin en etkili sunumlarından biri, 1961 yılında *Geological Society of America Bulletin*'de yer almıştır. İngiliz jeofizikçi Ronald Mason ve Kaliforniya'da bulunan Scripps Okyanusbilimi Enstitüsü'nden Amerikalı elektronik uzmanı Arthur Raff, Kuzey Amerika'nın batı yakasının dışında kalan okyanus zemininin kapsamlı manyetik araştırmalarını bir araya getirerek, neredeyse on yıl boyunca iş birliği yapmıştı. Yayınlarının en önemli unsuru Juan de Fuca Tepesi'nin, Oregon, Washington Eyaleti ve British Columbia'dan yalnızca bir günlük deniz seyahatiyle ulaşılan, Pasifik deniz yüzeyi üzerindeki öne çıkan tepe özelliğinin ayrıntılı bir manyetik haritasıydı.

Mason ve Raff'ın sade siyah beyaz haritası (beyaz ve siyah şeritler sırayla normal ve ters manyetik alanları temsil eder) kuzey-güney eğilimli düzinelerce şeridi gösterir. Benzerlik, her biri yüzlerce kilometre genişliğinde, her birinde merkezdeki bir rift vadisine ilişkin simetrik şeritler şablonu bulunan geniş okyanus kabuğu kütleleri içinde varlığını sürdürür. Fakat bitişik kütleler arasında şablon kırılmış, dönüşüm fay hatlarıyla dengelenmiş ve kübist bir resim gibi eğrilmiştir. Bu faylardan biri olan Mendocino Kırılma Bölgesi üzerinde kurulan dengenin analizi, bin yüz yirmi altı kilometrelik kayda değer bir yanal değişimi açığa çıkarır. Dünya kabuğunun bu şekilde bozulması için epik içsel süreçler devrede olmalıdır.

Yerküre çapındaki tepe sistemlerinde benzer kanıtların birikmesiyle birlikte, jeologlar, jeofizikçiler ve okyanusbilimciler birbirleriyle yeni, bütünleşmiş bir çaba içinde konuşmaya başlamıştır. Okyanus zemini topoğrafyasının, sismolojinin, manyetizmanın ve kaya yaşlarının bağıntıları bütün olarak aynı sonuçlara işaret etmiştir. Okyanus kabuğu dünya çapında, volkanik aktivitenin dinamik bölgeleri olan tepe sistemlerinde oluşmaktadır. Deniz zemininin yayılma oranı, manyetik şeritlerin simetrik şablonlarında ve bazaltların yaşlarında kaydedilmiştir.

Bir etkili yazılar bütünü, kolektif jeolojik zihniyeti dönüştürmüştür ve 1960'ların ortalarına gelindiğinde herkes bir zamanlar sapkınlık olan şeyden emindir: Kıtalar hareket etmektedir. Atlantik Okyanusu, yüz milyon yıldan uzun süredir her yıl daha da genişlemektedir.

Kaybolan Kabuk Vakası

Levha tektoniği devriminin ilk yılları hızlı keşfin, değişen paradigmaların ve eşit ölçüde kafa karıştırıcı yeni soruların dönemiydi. Cevaplanmayan bir soru diğerlerinden ayrılıyordu: 1,6 kilometre genişliğinde yeni bir bazaltik kabuk alanı nasıl otuz bin yılda bir, Atlantik, Pasifik ve Hint okyanuslarında, kırk sekiz bin iki yüz seksen kilometreden fazla genişlikte okyanus ortası tepesine

eklenebiliyordu? Tüm bu yeni kabuk nasıl uyumlanıyordu? Şayet Dünya daha da genişlemiyorsa (ki 1950'lerde ve 1960'ların başında, Bruce Heezen'in de aralarında olduğu küçük fakat seslerini duyuran bir jeolog grubu savunulamaz genişleyen-Dünya senaryosunu savunmuştu) *eski kabuğun* bir yerlere gitmesi gerekiyordu.

Sismologlar çözümü buldu. 1960'ların soğuk savaş havasında, nükleer silahlar sismolojinin odak noktası (ve sismolojiyi fonlamanın temel kaynağı) hâline geldi. 1962 Küba füze krizinden sonra, Amerika Birleşik Devletleri ve Sovyetler Birliği bir Sınırlı Test Yasası Antlaşması'nda uzlaştı; bu antlaşma nükleer silahların test edilmesini yer altı patlatmalarıyla sınırlandırıyordu. Antlaşmanın doğrulanması, yerkürenin uzak bölgelerine yerleştirilen titreşime duyarlı araçların geniş (siz bunu pahalı olarak okuyun) bir dizilimi kullanılarak sürekli bir sismik görüntüleme yapılmasına dayanıyordu. Sonuçta ortaya çıkan Dünya Çapında Standartlaştırılmış Sismograf Ağı'nın (WWSSN) 120 istasyonu Amerika Birleşik Devletleri Jeolojik Araştırması'nın bir kolunun merkezi olan Golden, Colorado'daki merkezi bir bilgisayar işlem merkezine bağlıyordu. İlk kez yeryüzünde herhangi bir yerde, küçük depremlerin (ve büyük patlamaların) kesin yerlerini, derinliklerini, boyutlarını ve hareketlerini tespit etmek mümkündü.

Jeolojinin ikincil faydaları olağanüstüydü. Yeni araçlarıyla donanan jeofizikçiler, geçmişte tespit edilemeyen binlerce Dünya hareketini algılayabiliyor, dolayısıyla gezegen çapında geçmişte onaylanmamış olan deprem şablonlarını belgeleyebiliyordu. Yeryüzünün ani kabuk hareketlerinin neredeyse tamamının, yoğun sismik aktivitenin dar hatlarında (okyanus ortası tepeleri gibi yerlerde) gerçekleştiğini tespit ettiler. Başka pek çok deprem kıtasal sınırların yakınlarındaki volkan zincirlerine yakın bölgelerde gerçekleşir; örneğin Pasifik Okyanusu'ndaki ünlü "Ateş Çemberi"nde. Pasifik ağzının Filipinler'in, Japonya'nın, Alaska'nın, Şili'nin ve diğer tehlikeli alanların da aralarında olduğu bu şiddete eğimli bölgeleri, ortak bir şablon oluşturunuyordu.

Görece sık depremlerin (birkaç kilometre ya da daha az derinlikte olanların) açık denizde, okyanus zemininin derin çukurlarına

yakın yerlerde doğduğu, öte yandan bazıları yüz altmış kilometreden daha aşağıda doğan daha derin depremlerin, sahilden gittikçe daha içeride gerçekleştiği uzun süredir biliniyordu. Bilinen en derin depremler, genel olarak St. Helens Dağı ya da Washington Eyaleti'ndeki Rainier Dağı gibi tehlikeli patlayıcı volkan zincirlerinin (tipik olarak oldukça iç bölgelerde yer alan yanardağların) altında gerçekleşmiştir.

1960'lara gelindiğinde, WWSN'den gelen yeni veriler, derin okyanus çukurları, depremler ve yanardağlar arasındaki ilişkinin ayrıntılarına açıklık kazandırdı. Deprem derinliklerinin iç bölgelerdeki çukurlardan yükselişinin farklı şablonu, büyük okyanus kabuğu levhalarının mantoya, kıtaların altına, dalma kuşağı diye adlandırdığımız bölgeye düşüşünün bir resmini çizdi. Dünya, sıcak mantodan çok daha soğuk, dolayısıyla daha yoğun olan bazaltik kabuğu gerçek anlamda yutmuştur. Batan bazalt yakındaki kabuğu aşağıya doğru çektikçe ve büktükçe, derin okyanus çukurları oluşur. Okyanus tepelerinde oluşan her yeni kilometrekare kabuğa karşılık, eski kabuğun bir kilometrekaresi dalma kuşağında yok olur. Yeni tam anlamıyla eskiyi dengeler.

Sanki bir peçe kaldırılmış gibi, yeni levha tektoniği bilimi mutlak biçimde odak noktası hâline gelmiştir. Okyanus tepeleri ve dalma kuşakları yaklaşık bir düzine, her biri (daha derin mantoyla kıyaslandığında) soğuk, kolay kırılan (dolayısıyla deprem kırılmasına tâbi) ve yalnızca onlarca kilometre kalınlığında fakat yüzlerce ile binlerce kilometre arası genişlikte, yaklaşık bir düzine yer değiştiren levhanın sınırlarını tanımlar. Bu katı levhalar, basit biçimde, daha sıcak, daha yumuşak manto kayalarına doğru kayar. Pasifik Okyanusu'ndaki ateş çemberi, tek bir geniş levhayı, Antarktika'yı, onu çevreleyen denizler ise bir başka levhayı tanımlar. Kuzey ve Güney Amerika Levhaları, batıya doğru, Orta Atlantik Tepesi'nden Amerika'nın Pasifik kıyısına kadar uzanırken, Avrasya Levhası, Orta Atlantik Tepesi'nden Doğu Asya'nın Pasifik kıyısına kadar doğuya doğru uzanır. Batıdaki Orta Atlantik Tepesi'nden doğudaki Hint Okyanusu'nun ortasına kadar uzanan Afrika Levhası, yeryüzünün dinamik yüzeyinin merak uyandıran bir yönünü

ortaya koyar: Bir dizi gölün ve aktif yanardağların, yanı sıra düzenli olarak dünyanın en iyi koşucularını çıkaran yüksek irtifaların bulunduğu yeni bir rift vadisi oluşurken, Afrika kıtası bölünmeye başlamaktadır. Bir gün Afrika kıtası, aradaki yeni genişleyen bir okyanusla birlikte iki levhaya dönüşecektir.

Okyanus tepeleri yeni levha malzemeleri oluşturur ve dalma kuşakları eskilerini yutarken, Öklid senaryoyu bir kez daha karmaşıktırır: Dünya bir küredir. Bir küre üzerindeki levha büyümesinin ve dalmanın geometrisi, çentikli dönüşüm fay hatlarında, bazı levhaların birbirlerine sürtünmesini gerektirir; Mason ve Raff'e ait ünlü Juan de Fuca Tepesi'nin manyetik haritasındaki denge şeritleri bu şekilde ortaya çıkmıştır. Bilinen pek çok Kaliforniya depremini tetikleyen şiddetli San Andreas fayı da bu türdeki bir diğer birleşme çizgisidir. Güçlü Kuzey Amerika Levhası, güçlü Pasifik Levhası'na göre güneydoğu yönünde hareket ettikçe, fay hattı üzerinde daha fazla basınç oluşur. Bu önlenemeyen levha hareketleri, Los Angeles ve San Francisco'da yaşayanları bir sonraki "büyük deprem"e her gün biraz daha yaklaştırır.

Levha tektoniğinin basit geometrisine ilişkin söylenecekler bu kadar. Peki ya levha hareketlerini güçlendirmesi gereken epik kuvvetler? Kıtaların bütüncül olarak kaymasına, sürtünmesine ve milyonlarca yıl boyunca çarpışmasına neden olan şey nedir? Cevap yeryüzünün iç ısısında gizlidir. Dünya sıcak, uzay ise soğuktur. Termodinamiğin ikinci yasası olan evrenin genel çekirdek kavramında ısının her zaman daha sıcak objelerden daha soğuk olanlara doğru aktığı ifade edilir; ısı kademeli olarak yayılmalı, bir şekilde denkleşmenin bir yolunu bulmalıdır.

Termal enerjinin aktarımını kolaylaştıran üç bilindik mekanizmayı hatırlayın. Her sıcak obje sıcaklığını çevresindekilere kızıl ötesi *ışınım* şeklinde aktarır; ısı aynı zamanda, çok daha az etkin biçimde de olsa bir sıvı kütlesi daha sıcak ve daha soğuk bölgeler arasında aktığında, dolaysız temas ya da *iletim* ve *ısıyayım* yoluyla da hareket eder. Dünya termodinamiğin ikinci yasasına uymalıdır. Fakat ısı kızgın çekirdekten soğuk kabuğa doğru nasıl etkin biçimde hareket edebilir? Kaya ve magma kızıl ötesi ışınlı

engeller, öte yandan ağır iletim çok daha etkin değildir. Dolayısıyla temel unsur, yumuşamış şekerleme benzeri sıcak manto kayalarının ısıyayıdır.

Yeryüzünün yüzeyindeki kayalar sert, kolayca kırılan maddelerdir fakat aşırı ısınmış basınçlı tencerenin, yani mantonun derinliklerinde, kayalar yağ gibi yumuşar. Milyonlarca yıl içinde, derin iç bölgenin basınçları altında, kayalar deforme olur, sızıntı yapar ve akar. Daha soğuk, daha yoğun kayalar derinlere gömülürken, daha sıcak, daha hareketli kayalar kademeli olarak yüzeye çıkar. Her biri binlerce kilometre genişliğinde ve yüzlerce kilometre derinliğinde büyük ısıyayım birimleri, yeryüzünün mantosunu gözlerden uzak devasa bir döngüyle altüst eder. Bu gezegensel karışımların temposu da aynı ölçüde geniştir; ısıyayım biriminin tek bir devrini tamamlaması, yüz milyon yıl ya da daha uzun sürebilir.

Başlangıçta, belki bir milyar yıldan daha uzun bir süre boyunca, yeryüzünün yeknesak bazalt kabuğunun altındaki manto ısıyayımı, kaotik, türbülanslı bir karmaşa olmalı. Yoğunluğu düşük granitlerin sıcak eriyikleri, zaman zaman, daha soğuk, daha yoğun bazaltı bozarak biriktikleri yüzeye dağınık titreşimler ve gayzerler olarak çıktılar. Bu daha soğuk kabuğun ayrılmış yoğun parçaları, küresel çapta bir ısı değişimiyle, yavaş yavaş iç bölgeye doğru çöktü.

Bunu izleyen yarım milyar yıl içinde, mantonun dalgalanması daha organize hâle geldi. Her biri yükselen gayzerlere, yanardağ katmanlarına ve alçalan kabuk bloklarına sahip olan düzinelerce daha küçük ısıyayım birimi, her biri yüzlerce kilometre derinlikte ve binlerce kilometre genişlikte bir avuç devasa döngüde birleşti. Yeni, sıcak bazaltik kabuk, bu ısıyayım birimlerinin genişleyen deniz tabanı tepeleri boyunca yükseldiği yerde oluştu, öte yandan eski, soğuk bazaltik kabuk mantoya dik bir açıyla dalıyordu; levha tektoniğinin yeni, dönüştürücü süreçlerinin gitgide daha fazla hâkim olduğu bir dünyada, dalma kuşakları. Enkesitte, yeryüzünün çalkantılı dış katmanları bir çift yönlü girdaplar yığını gibi görünebilir, her dönüş yüz milyon yıl ya da daha fazla sürebilirdi.

Şimdi olduğu gibi o zaman da yeryüzünün evrilen yüzeyi çok daha aşağıda gerçekleşen epik süreçleri yansıtıyordu. Büyük bazaltik volkan tepeleri, yükselen magmaların ısıyayım bölgelerinde büyüyordu. Çıkan eski kabuk aşağıya, mantoya doğru dalıyor, yandaki okyanus zeminini büküyor ve kabartıyordu. Dalma aynı zamanda oldukça önemli olan granit üretimini de hızlandırıyordu. Soğuk, nemli, dalmış bazalt kabuğu daha derine battıkça ve yeryüzünün içine çekildikçe, ısınıyor ve erimeye başlıyordu; bütünüyle değil ama belki yüzde yirmi ya da otuz oranında. Bu artan granitik magma hacimleri yüzeye çıktı ve yüzlerce kilometre uzunluğunda gri volkanik ada zincirleri oluşturdu. Kıtaların oluşması için ortam hazırды.

Devrim

Granit yüzer, bazalt batar: Kıta oluşumunun temelinde yatan sebep budur. Granitik bileşime sahip magmalar, ana bazaltik kayalardan çok daha az yoğundur, dolayısıyla bu taze eriyikler, yüzeye yakın kaya kütlelerini kristalleştirecek ya da yüzeye köz ve kül katmanları çıkaran volkanlardan püskürerek atılacak biçimde, yavaş yavaş, kaçınılmaz olarak yükselir. Milyarlarca yıllık Dünya tarihi boyunca, bu kesintisiz süreç yoluyla sayısız granit adası oluşmuştur.

Levha tektoniği yalnızca bu granit kökenli ada zincirlerini oluşturmayıp aynı zamanda onları kıtalar şeklinde birleştirmiştir. Meselenin aslı, granitin batamamasındaki basit gerçeğin altında yatar. Yoğun bazalt üzerinde kolaylıkla yüzdüğü mantoya batar fakat granit su yüzeyinde kalabilen bir mantar tıpa gibidir. Bir kez oluştuktan sonra, yüzeyde, korunumlu olarak kalır. Batma daha fazla ada ortaya çıkardığından, granitin toplamdaki alanı kaçınılmaz olarak artar.

Batmayan granit adalarıyla bezeli, batan bir okyanus kabuğu levhası hayal edin. Bazalt batar fakat adalar batmaz. Yüzeyde kalmalı, dalma kuşağının hemen üzerinde bir kara şeridi oluşturmalıdır. Onlarca milyon yıl geçtikçe yeni granit eriyiği kütleleri, büyüyen kıtayı kalınlaştıracak ve genişletecek biçimde batan levhadan

yükselirken bile, gittikçe daha fazla sayıda granit adası, gitgide daha geniş bir şerit oluşturacak biçimde üst üste yığılır. Adalar ön-kıtalar oluşturacak şekilde, ön-kıtalar ise kıtaları oluşturacak biçimde çoğalır, tıpkı Güneş Sistemi'mizdeki kondritlerin küçük gezegenimsi yapıları oluşturacak şekilde, gezegenimsi yapıların ise gezegenleri oluşturacak biçimde çoğalmış olması gibi.

Levha tektoniğinin epik döngüsü dünyamızı dönüştürür. Yeryüzünün ince, soğuk, kolayca kırılan yüzeyi, kaynayan bir kâse çorbanın üzerindeki köpük gibi çatlar ve yer değiştirir. Yeni bazaltik kabuk, derin ısıyayım birimlerinin kaynağının olduğu yeri açığa çıkaran volkanik tepelerden akar. Eski kabuk, ısıyayım birimlerinin nerede alçaldığını açığa çıkaran dalma kuşaklarında yutulur. Yeryüzünün en şiddetli yüzey bozulmaları (en yoğun depremler, en güçlü volkanlar), derin iç bölgenin küresel çaptaki çok daha enerjik hareketleriyle karşılaştırıldığında, önemsiz, rastlantısal görüntülerdir.

Levha tektoniği aynı zamanda Dünya bilimlerinde de devrim yaratmıştır. Dikey tektoniğin geçmişteki karanlık çağlarında, her jeolojik disiplin ayrıydı ve görünürde tüm diğer disiplinlerle ilgisizdi. Devrimden önce, paleontologlar okyanusbilimcilerle görüşme gereği duymuyordu; volkanlar üzerinde yapılan çalışmaların maddenin jeolojisiyle pek az ilgisi vardı, jeofizikçiler yaşamın kökenleri ve evrimle ilgilenmiyordu ve bir ulusun kayalarının başka bir ulusun kayalarıyla bariz bir ilgisinin olmayışının yanı sıra, uzaktaki okyanus zemininde bulunan kayalarla da çok daha az ilgisi vardı.

Levha tektoniği, yeryüzüne ilişkin her şeyi birleştirdi. Artık nadir görülen fosil organizmalarının yerleri geniş bir alana yayılan okyanuslarda mutlak biçimde eşleştirilebilir. Yok olan volkanik bölgeler, madencileri ilgili dalma kuşaklarında, kıtasal kayalarda katılaştırılmalarından bu yana uzun süredir gizlenen değerli maden yataklarına yönlendirir. Yer değiştiren kıtalar üzerinde yapılan jeofiziksel çalışmalar bitki ve hayvanların evrimi üzerindeki temel etkilere işaret eder. Levha tektoniği, uzay ve mekânda tek bir birleştirici prensibi olan, kabuktan çekirdeğe, çok küçük olandan

küresel ölçeğe kadar bütünlüklü bir küresel sistem olarak yeryüzünü açığa çıkarır.

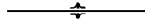
Granit üretiminin gayzerin etkin olduğu düzensiz, dikey tektonik adalar bileşiminden, batmanın etkin olduğu düzenli bir kıtalar bütününe dönüşmesi zaman almıştır. Fakat Dünya 1,5 milyar yaşına geldiğinde, ısı yayan manto (yeryüzünün kütlesinin ve ısı enerjisinin büyük bölümünü tutan iki bin dokuz yüz kilometre kalınlığındaki bölge) gezegenimizin yüzeyini geri dönülmez biçimde dönüştürmüştü. Siyah bazalttan farklı olarak, büyük, çorak granit kıtalar beyazımsı gri görünümdeydi, bu kuvars ve feldispatın birleşiminin tipik rengiydi. Dolayısıyla üç milyar yıl geçmişte kalan o antik dünyaya seyahat eden bir zaman yolcusu olsaydınız, bazı benzer özellikler bulurdunuz. Kuzey Kutbu'nun yükseklerindeki engebeli kıyı şeritlerinden farklı olmayan, bitki örtüsünden yoksun, dik tepelerde ve sarp çeperli vadilerde geziyor olabilirdiniz. Aralarda güneşli mavi göklerin ve görkemli beyaz bulutların hâkim olduğu günlerin yaşandığı şiddetli hava döngüleri deneyimlerdiniz. Okyanusun ara sıra bazalt deniz yüzeyinde kristal katmanlar olarak biriken, kalsiyum ve magnezyum karbonatların da aralarında olduğu çözünmüş minerallerle dolduğunu görürdünüz. İlk beyaz kumlu sahillerdeki, gri granitten kopan dayanıklı kuvars parçalarının bol miktarda bulunduğu o serin, mavi okyanusun kıyısında uzanabilirdiniz. Nitrojen ve karbondioksitin yoğun olduğu fakat yaşam veren oksijenin en küçük esintisinden yoksun olan ağır atmosferi hemen içinize çekerdiniz.

Kıtaların (sağlam granit kabuktan inşa edilen büyük kara parçalarının) keşfi, yeryüzünün büyük evrimsel töreninde küçük bir gösteriydi. Aşırı ısınma ve yaygın yüzeye yakın bazaltın kısmen erimesiyle oluşan granit bölgeleri, gezegenimizin aslen bozulmamış olan su altındaki siyah yüzeyinde büyüyen gri kabuklar gibiydi. Daha yoğun bazaltik tabanın üzerinde yüzen, kalınlaşan granit yığınları kademeli olarak okyanus seviyesinin üzerine çıkabildi ve bu şekilde tüm büyük kıtaların köklerini (bugünkü insan merkezli bakış açımızla katı Dünya olarak algıladığımız şeyi) ortaya çıkardı.



Altıncı Bölüm

Canlı Dünya



Yaşamın Kökenleri

Dünya'nın Yaşı: 500 milyon ila 1 milyar yıl arası

Beş yüz milyon yaşındaki bebek yeryüzü, yakın zamanda ne kadar erken büyümüş olacağına dair pek az ipucu veriyordu. Elbette yeryüzünde çarpıcı ölçüde volkanik faaliyet vardı fakat Güneş Sistemi'mizdeki başka pek çok gezegen ve uydu için de aynı şey geçerliydi. Dünya çevresini saran okyanuslarla süslenmişti fakat Jüpiter'in dev uyduları Europa ve Callisto'nun seksen kilometreden daha derin buzlarla kaplı okyanuslarla kuşatılmış olduğu, dolayısıyla yüzeydeki değerli sıvının çok daha büyük oranları tuttuğu o ilk günlerde, Mars için de aynı şey geçerliydi. Levha tektoniği gezegenimizin dönüşmesine yardımcı oldu fakat o ilk günlerde, Venüs ve muhtemelen Mars, kendilerine ait bir ısıyayım güdümlü tektoniğe sahipti.

Kimya da yeryüzünü bölmedi. Bazalt ve granit tüm kayalıklı gezegenlerin temel taşlarıydı. Oksijen, silikon, alüminyum, magnezyum, kalsiyum ve demir en yoğun içerikleriydi. Yeryüzünün kendisine ait bir karbon, nitrojen ve sülfür payı vardı fakat Güneş Sistemi'mizdeki diğer gezegenler de o hayati unsurlarla eşit ölçüde donatılmıştı. Neredeyse her ölçüye göre, dört milyar yıl önceki Dünya oldukça sıradan bir gezegen gibi görünüyordu.

Fakat çok yakında, Dünya bilinen dünyalar arasında özgün bir yer edinecekti. Kuşkusuz beş yüz milyon yaşındayken de bu anlamda özgündü, başka hiçbir gezegen ya da uydu bu türden kapsamlı değişim dönemleri geçirmemişti; başka hiçbir gezegen dış görünümünü bu kadar derinlemesine ve bu kadar sık biçimde değiştirmemişti. Fakat bu başkalaşımalar yalnızca ölçek açısından farklıydı, tür açısından değil. Gezegensel değişimin en dinamik lokomotif (yeryüzünü bölen şey) henüz ortaya çıkmamıştı. Yalnızca Dünya fazlasıyla, sürekli canlı hâle geldi. Biyosferin kökenleri ve evrimi yeryüzünü bilinen tüm diğer gezegenlerden ve uydulardan ayırır.

Yaşam Nedir?

Hayatta olmak ne anlama gelir? Yeryüzünü evrenin geri kalanından bu kadar farklı kılan bu olgu nedir? Yaşamı iç içe geçmiş bir dizi özellik olarak da tanımlamaya çalışabiliriz; hareket etme, büyüme, uyumlanma ve üreme becerilerinin eklendiği karmaşık bir yapı. Bu türden farklı hücresel özellikleri, genetik DNA molekülünün bir çeperi ya da uzun sarmalları olarak da gösterebiliriz. Fakat tanılayıcı özelliklerin listesi ne kadar uzun olursa olsun, istisnalar her zaman var gibidir. Likenler hareket etmez. Katırlar üremez.

Kimya yaşamın tanımlanması için daha somut bir temel sunar, çünkü yaşayan her şey büyüleyici bir karmaşıklık ve uyum içinde kimyasal reaksiyonlar geçiren düzenli moleküler sistemlerdir. Her yaşam formu dış dünyadan (çevreden) moleküler bir bariyerle ayrılan birbirinden ayrı molekül toplulukları (hücreler) içerir. Bu varışlı kimyasal yığınları birbirinden bağımsız, birliktayken yaşayanları yaşamayanlardan tartışmasız biçimde ayıran iki kendini koruma biçimi (metabolizma ve genetik) geliştirmiştir.

Metabolizma, tüm yaşam formlarının çevrelerindeki atom ve enerjileri daha fazla hücre malzemesine dönüştürmek için kullandığı değişken bir kimyasal reaksiyonlar serisidir. Hücreler, küçük kimyasal fabrikalar gibi moleküler ham maddeleri ve yakıtı alır, güçlkle kazanılan bu kaynakları hareketi, onarımı, büyümeyi ve

zaman zaman üremeyi kolaylaştırmak için kullanır. Kontrol edilemeyen orman yangınlarına ya da ilk element üreten yıldızın nükleer zincir reaksiyonlarına karşıt biçimde, hücreler kimyasal fabrikalar gibi bu reaksiyonları olumlu ve olumsuz geri bildirimlerle zarifçe kontrol eder ve düzenler.

Metabolizma yaşamın tanımlanması için tek başına yeterli değildir. Cansız çevreden farklı olarak, hücreler bilgiyi DNA molekülleri biçiminde taşır ve bu moleküler bilgiyi kopyalayarak bir nesilden diğerine iletebilir. Dahası, bilgi değişebilir; moleküller sıklıkla genetik değişikliklere yol açan hatalarla kopyalanır. Dolayısıyla değişimler kimyasal bir yeniliği destekler; bunlar hücre popülasyonlarının daha az etkin diğer popülasyonlarla rekabet etmesine, çevresel değişim dönemlerinde hayatta kalmasına ya da tutunma noktalarını yeni çevresel konumlar yönünde genişletmelerine olanak sağlayan yeniliklerdir.

Dolayısıyla metabolizma ve genetik, canlı maddeyi bir arada karakterize etmelidir. Fakat biyologlar şaşırtıcı biçimde, yaşamın evrensel olarak kabul gören tek bir tanımını geliştirmekte başarısız olmuştur. NASA'nın yaşamın kökenlerini ve onun diğer dünyalar üzerinde var olma olasılığını araştırmakla görevli olan Eksobiyoloji Programı, belki de en yakın noktaya erişmiştir. Scripps Araştırma Enstitüsü'nden Gerald Joyce'un başkanlığını yaptığı, 1994 yılında düzenlenen bir NASA panelinde, güncel bir cümle üzerinde uzlaşa sağlanmıştır: "Hayat, Darwinci bir evrim geçirmeye muktedir, kendini idame ettiren bir kimyasal sistemdir."

Laboratuvarda yaşam koşulları oluşturma çabaları bağlamında bir lider olan Joyce (sentetik biyoloji denilen fütürist bir alanın parçası) yakın zamanda bu nirengi noktasına ulaşmıştır; bu kesinlikle kayda değer bir dönüm noktasıdır. Hem kendi kendine yeten hem de gelişen, etkileşim içinde binlerce farklı molekülden oluşan test tüpüne bağlı bir koleksiyon geliştirmiştir. Camla çevrelenen bu karmaşık süreç, deneyin başından itibaren hâlihazırda mevcut olan farklı moleküllerin tam olarak kopyaları olmakla birlikte gelişen oranlarıyla sonuçlanır. Joyce, moleküler kopyaları basit biçimde, bikkınlık verecek ölçüde üreten bir kimyasal sistemin, bu

moleküllerin göreceli oranı zaman içinde gelişse de moleküler bir Xerox makinesinden biraz daha gelişmiş olduğunu fark etmiştir. Buna karşılık, doğal yaşam sistemlerinin çoğalma, dolayısıyla potansiyel olarak bütünüyle yeni şeyler yapma -yeni çevresel bölgeler keşfetme, beklenmedik çevresel değişimler atlatma, yeni görevler yerine getirme, kaynaklar elde etmek için rekabet ettiği komşularına üstün gelme- becerisi vardır. Dolayısıyla Joyce, tanımını yenilik özelliğini dâhil edecek biçimde gözden geçirmiştir. “Yaşam *yeniliği kapsamına alma* ve Darwinci evrim geçirme becerisine sahip, kendine yeten bir kimyasal sistemdir.” Bu gelişmeye ilişkin belki de en dikkate değer unsur, yaşamın inceliğinin ayırdına varan Jerry Joyce’un, laboratuvarında yaşam oluşturan ilk kişi olmanın Frankensteinca olmakla beraber tarihsel ayrımı üzerinde hak iddia etmek yerine, NASA’nın tanımını alçak gönüllülükle değiştirmiş olmasıdır.

Ham Maddeler

Cansız Dünya iç içe geçmiş metabolizma ve genetik özelliklerini nasıl türetmiştir? İçimizden yaşamın kökenleriyle ilgilenen çoğu kişi, ilk hücrenin ortaya çıkışının kaçınılmaz bir jeokimyasal süreç oluşundan kuşkulandır. Dünya gerekli olan tüm ham maddeye sahipti. Okyanuslar, atmosfer, kayalar ve minerallerde gerekli elementler bol miktarda bulunuyordu: Karbon, oksijen, hidrojen, nitrojen, sülfür ve fosfor. Enerji de bol miktardaydı: Güneş ışıınımı ve yeryüzünün içsel ısı en güvenilir kaynakları sunuyordu fakat yıldırım, radyoaktivite, meteor darbeleri ve başka pek çok enerji formu katkı sağlamış olabilir. (Ve sonuç olarak element ve enerji kaynakları gibi yaşamın kökenlerine ilişkin pek çok kuram vardır.)

Neredeyse herkesin uzlaştığı tek bir konuya ilişkin olarak: Periyodik tablonun en çok yönlü elementi olan karbon, başrolü oynuyordu. Başka hiçbir elementin bu denli zengin bir moleküler tasarımı ya da bu denli çeşitli moleküler işlevi yoktu. Karbon atomları, diğer karbon atomlarının yanı sıra pek çok diğer elementle (özellikle hidrojen, oksijen, nitrojen ve sülfürle) tek seferde dört kadar

bağ kurma yönünde benzersiz bir beceriye sahiptir. Karbon uzun atom zincirleri, iç içe geçmiş halkalar, kollara ayrılan karmaşık düzenlemeler ya da neredeyse hayal edilebilecek tüm diğer biçimleri oluşturabilir. Dolayısıyla proteinlerin, karbonhidratların, yağların, DNA ve RNA'nın bel kemiğini oluşturur. Yalnızca çok yönlü karbon tabanlı moleküller yaşamın ikiz tanımlayıcı özelliğini paylaşır görünür: Çoğalma ve gelişme becerisi.

Yediğimiz her yiyecek parçası, aldığımız her ilaç, vücutlarımızın yapısı ve yaşayan tüm diğer canlıların bedenleri, karbonla doludur. Karbon temelli kimyasallar her yerdedir: Boyalarda, yapıştırıcılarda, plastiklerde, giysilerinizin ipliklerinde ve ayakkabılarınızın tabanlarında, bu kitabın sayfalarında, ciltlenmesinde, mürekkebinde, kömür ve yağdan, doğal gaz ve benzine kadar enerjinin yoğun olduğu tüm yakıtlarda. Ayrıca, on birinci bölümde de göreceğimiz gibi, karbon bazlı yakıtlara ve diğer kimyasallara gittikçe daha fazla bağımlı hâle geliştik, yeryüzünün yüzeye yakın çevresindeki tedirgin edici kaymalarda; muhtemelen milyonlarca yıl içinde benzeri olmayan bir hızda gerçekleşen değişikliklerde görülebilir.

Bununla beraber, karbon kendi başına jeokimyadan, biyokimyaya kayda değer ilerlemesini göstermiş olamaz. Yeryüzünün bütün büyük dönüştürücü güçleri (su, ısı, ışık ve kayaların kimyasal enerjisi) yaşamın yeniden doğuşunu sağlamıştır.

Birinci Adım: Tuğlalar ve Harç

Yaşamın olmadığı bir dünyadan canlı bir dünyaya antik geçişin tam olarak nasıl (ya da ne zaman) gerçekleştiğini henüz kimse bilmiyor fakat dünya çapındaki düzinelerce laboratuvarında yapılan inceleme araştırmalardan temel prensipler doğuyor. Biyogenez, her biri gelişen dünyaya kimyasal bir karmaşa ekleyen adımların bir sonucu olarak ortaya çıkmış olmalı. Önce moleküler yapı taşlarının oluşması gerekti. Daha sonra o küçük moleküllerin seçilmesi, yoğunlaşması ve yaşamın temel yapılarında (çeperler, polimerler ve bir hücrenin diğer işlevsel bileşenleri) örgütlenmesi gerekti.

Moleküller topluluğu, bir nesilden diğerine genetik bilgi aktarımının bir aracını geliştirirken, bir noktada kendi kopyalarını oluşturması gerekti. Daha sonra Darwinci doğal seleksiyon yoluyla evrim devreye girdi; yaşam ortaya çıktı.

Biyogenez alanındaki ilk ve en iyi anlaşılan adım yaşamın moleküler yapı taşlarının (şekerler, aminoasitler, lipitler ve daha fazlasının) yaygın üretimiydi. Tümü çok amaçlı karbon elementi üzerine kurulu olan bu önemli kimyasallar, enerjinin karbondioksit ve su gibi basit moleküllerle etkileşime girdiği her yerde ortaya çıkar. Yaşamın ham maddeleri yıldırımın atmosferi deldiği, volkanik ısının okyanusun derinliklerini kaynattığı, hatta ultraviyole radyasyonun Dünya doğmadan önce moleküler bulutları uzayın derinliklerinde yıkadığı yerde oluşmuştur. Biyomoleküller göklerden yağdıkça ve derinliklerden yükseldikçe, antik yeryüzünün denizleri yaşamın özdeğinde giderek daha da yoğunlaşmaya başlamıştır.

Yaşamın kökenlerine ilişkin modern araştırmalar, 1953 yılında, bugün biyogenez alanında yapılan en ünlü deney olma özelliğini koruyan şeyle birlikte başlamıştır. Chicago Üniversitesi'nde görev yapan Nobel ödüllü bir profesör olan kimyager Harold Urey ve azimli lisansüstü öğrencisi Stanley Miller, yeryüzünün ilk evrelerine benzer bir yapı oluşturmak amacıyla basit ve zarif bir masa üstü cam araç tasarlamıştır. Elektrik kıvılcımları yıldırıma benzer bir görünüm oluştururken, hafifçe kaynayan su sıcak Hadean Okyanusu'nun yerine geçmiş ve basit gazlardan oluşan bir bileşim yeryüzünün ilkel atmosferini taklit etmiştir. Birkaç gün sonra, sınırlı, renksiz su, pembemsi, daha sonra organik moleküllerin karmaşık bir bileşimiyle kahverengi bir renk alır. Şeffaf cam yapışkan siyah organik tortuya boyanır.

Miller'ın rutin kimyasal analizleri bol miktarda aminoasidi ve yaşamı oluşturan diğer yapıları açığa çıkardı. *Science* dergisindeki, 1953 yılında yayınlanan ve sonuçları duyuran yazısı, dünya çapında sansasyonel başlıklar oluşturdu. Kısa süre sonra, kimyagerler prebiyotik kimya alanında çalışmak üzere bir araya geldi. Miller-Urey deneyindeki atmosfer gazlarının net bileşimi sorgulanırken, aynı alanda bunu izleyen binlerce farklı çalışma, herhangi

bir şüpheyi yer bırakmaksızın, yeryüzünün ilk dönemlerinde yaşamın önemli moleküllerinin bol miktarda bulunduğunu ortaya koydu. Gerçekten de 1953 kıvılcım deneyi ve ardılları öyle başarılı oldu ki alandaki pek çok kişi kökenlerin gizeminin büyük oranda çözüldüğünü düşündü.

Bu ilk heyecanın ve bunu izleyen odaklanmanın bir bedeli olmuş olabilir. Miller'ın ustalıklı deneyi, yaşamın kökenleri araştırmasını dolaysız biçimde organik kimyagerlerin çalışmalarına dâhil etti ve yaşamın (Charles Darwin'in yaklaşık yüz yıl öncesine ait özel kurgularını çağrıştıran biçimde) prebiyotik bir çorbadan -belki "küçük, ılık bir göletten" doğduğu paradigmasını inşa etti. 1950'lerde yaşayan az sayıda deneyselci, doğal jeokimyasal çevrelerin, günlük gece/gündüz, sıcak/soğuk, ıslak/kuru vb. döngüleriyle değişen sarsıcı karmaşıklıklarını dikkate aldı. Doğal grad-yentlerin skalasını da (örneğin volkanik magmanın soğuk okyanus suyuyla etkileşime geçtiğindeki ısıyı ya da bir akarsuyun tuzlu okyanusa girdiği andaki tuzluluk oranını) değerlendirmediler. Miller'ın deneylerinden hiçbirinde, düzinelerce büyük ve küçük elementle kimyasal açıdan büyük çeşitlilik sunan kaya ve mineralleri ve onların reaktif enerjik kristal yüzleri bir araya getirilmedi. Yeryüzünün Güneş'in aydınlattığı yüzeyinin tüm eylemlerin gerçekleşmiş olması gereken yer olduğunu varsayıyorlardı.

Miller'ın etkisi güçlüydü ve o ve takipçileri, hayatın kökenleri topluluğunu otuz yıldan uzun süre yönettiler. Bunu bir yayınlar seli izledi, yeni dergiler ortaya çıktı ve hükümet fonlaması "mile-ritler"e akarken onur madalyaları ve ödüller verildi. Daha sonra, 1980'lerin sonlarında, açık deniz siyah duman ekosistemleri, "ilk-sel çorba"ya canlı bir alternatif sundu. Aydınlık okyanus yüzeyinden uzaktaki bu derin, karanlık bölgelerde, mineralin yoğun olduğu sıvılar sıcak volkanik kabukla etkileşime geçerek okyanus zeminindeki gayzer benzeri ağızları oluşturur. Kaynar su püskürtmeleri derin soğuk okyanusla etkileşime geçer ve minerallerin sürekli çökmesine yol açar (bunlar siyah "duman"ı oluşturan mikroskobik parçalardır). Kabuk ve okyanus arasındaki ara yüzeyde

bulunan kimyasal enerjiyle beslenen bu şaşırtıcı gizli yerlerde, bol miktarda yaşam kaynağı vardır.

Kökenler paradigmasına ilişkin çatışma, bilimin sosyolojisine ilişkin çok fazla şeyi açığa çıkarır. Öte yandan, Miller-Urey süreci gerçek yaşamda kullanılabilecek şaşırtıcı ölçüde benzer bir biyomoleküller grubu ortaya çıkarmıştır. Aminoasitlerin, karbonhidratların, lipidlerin ve bazların karışımı iyi dengelenmiş bir diyeteye yakın görünümündedir. Harold Urey'in esprisini yaptığı gibi "Şayet Tanrı bunu bu şekilde yapmadıysa sıkı bir iddiayı kaybetmiştir." Fakat Miller grubuna gerçekten inananlar, yıldırım kökenli ilksel çorba fikrini desteklemekten çok daha fazlasını yapmıştır; bir intikam duygusuyla, yarışan fikirlerin tümünü toplumsal olarak reddetmişlerdir.

La Jolla komplosunun engelleme politikasının etkinliği, sözü edilen siyah dumanların şaşırtıcı keşfiyle, yanı sıra NASA'nın kapsamlı amaçlarının güçlü etkisiyle azalmaya başlamıştır. Siyah dumanların denizaltı ağızlarındaki varlığı yaşamın uç çevrelerde (geçmişteki biyolog nesillerinin asla bakmayacağı yerlerde) bol miktarda bulunduğu ilişkin artan bir farkındalığın altını çizmiştir. Bugün mikropların maden atıklarından akan asitli akıntılarda ve volkanik bölgelerin üzerindeki kaynayan havuzlarda bol miktarda bulunduğunu biliyoruz. Donmuş Antarktika kayalarının içinde bir yaşamı tamamlıyor ve Dünya yüzeyinin kilometrelerce üzerindeki oldukça büyük toz taneciklerinde varlıklarını sürdürüyorlar. Yeryüzünün katı yüzeyinin kilometrelerce altında bulunan, hücrelerin en dar yarıklarda ve ince çatlaklarda ve minerallerin yetersiz kimyasal enerjisiyle yaşadığı mikrobik ekosistemler (tüm ağaçlar, filler, karıncalar ve insanlar kadar) yeryüzünün biyokütlesinin yarısını da açıklayabilir. Şayet bu türden bir organizma gelişebiliyorsa (yeryüzündeki yaşamın önemli bir bölümü asteroit ve kuyruklu yıldızların şiddetli küçümsemelerinden korunmuş olarak derin çevrelerde sürdürülüyorsa) yaşam neden burada başlamış olmasın?

Bilim fonlaması, büyük keşif beklentileriyle yakından ilişkili olan NASA, bu olasılığı hemen değerlendirmek istedi. Şayet yaşam bir Miller-Urey senaryosunda, sularla kaplı bir dünyanın Güneş'te

kavrulan yüzeyinde doğmak zorundaysa Dünya ve muhtemelen Mars (en erken aşamalarında, ilk beş yüz milyon yıl içinde) erişebildiğimiz, canlı biricik makul dünyalardır. Fakat eğer yaşam yüzey altındaki bir volkanik bölgenin siyah, sıcak derinliklerinden doğabiliyorsa başka pek çok gök cismi de keşif için cezbedici hedeflere dönüşür. Bugün Mars'ta derin hidrotermal bölgeler bulunuyor olmalıdır; belki de şu anda bile bünyesinde yaşamlar barındırmaktadır. Jüpiter'in uydularının pek çoğu, aynı zamanda biyolojik araştırma için yeterli olgunluktadır, tıpkı Satürn'ün organik açıdan yoğun, Dünya boyutundaki uydusu Titan gibi. Daha büyük asteroitlerden bazıları bile derin, yaşam sağlayan, sıcak, nemli bölgelere sahip olabilir. Şayet yaşam yeryüzünün derinliklerinde doğduysa NASA'nın eksobiyoloji araştırması (ve fonlaması) kesinlikle onlarca yıl sürecektir.

Carnegie Enstitüsü meslektaşlarımla birlikte kökenler oyununa görece geç kalan bir grubuz. Laboratuvarımızın 1996 yılında düzenlenen ilk NASA sponsorlu deneyleri, özel olarak yüksek ısı ve basınçların varlığını koruduğu siyah dumanların düzenleniş biçimlerindeki organik sentezi test etmek üzere tasarlanmıştı. Miller gibi basit gaz bileşimlerini enerjik koşullara maruz bıraktık -bizim durumumuzda, tıpkı derin bir volkanik bölgede bulacağınız gibi ısı ve kimyasal açıdan reaktif mineral yüzeylerine. Miller gibi, aminoasitler, lipidler ve yaşam sağlayan başka yapılar oluşturduk. Bugün çeşitli laboratuvarlarda çoğaltılan ve geliştirilen sonuçlarımız, şüpheyi yer bırakmayacak biçimde yaşamın moleküllerinden oluşan bir topluluğun sık kabuğun basınçlı tencere koşullarında kolaylıkla sentezlenebileceğini gösteriyor. Karbon ve nitrojen içeren volkanik gazlar, gerçek anlamda yaşamın tüm temel yapı taşlarını oluşturacak biçimde sıradan kayalara ve deniz suyuna tepki verir.

Dahası, bu sentez süreçlerine, tıpkı demirin bilindik biçimde paslanması ya da bir *marshmallow*'un kızartılması gibi indirgeme ve oksitlenme reaksiyonları ya da redoks reaksiyonları denilen görece yumuşak kimyasal reaksiyonlar hâkimdir. Bunlar yaşamın metabolizmada, yıldırımın ya da ultraviyole radyasyonun şiddetli iyonlaştırıcı etkilerine mutlak zıtlık içeren biçimde

kullandığı türden kimyasal reaksiyonlardır. Gerçekten de şiddetli yıldırımlar küçük biyomoleküllerin üretimini kolaylaştırabilse de aynı ölçüde kolayca, bu yapı taşlarını moleküler parçalara bölebilir. İçimizden kökenler oyununu oynayan pek çok kişi için, yeryüzünün prebiyotik moleküllerini, az çok bugün hücrelerin yaptığı şekilde daha az enerjik kimyasal reaksiyonlarla oluşturmuş olması çok daha fazla anlam taşır.

Stanley Miller ve takipçileri, elde ettiğimiz sonuçları yanlışlamak ve araştırma programımızı durdurmak için ellerinden geleni yapmışlardır. Bir eleştirel yayınlar fırtınasında, yanardağ ağızlarının yüksek ısıların her türlü işlevsel biyomolekülü hemen tahrip edeceğini iddia etmişlerdir. “Ağız hipotezi tam bir fiyasko,” diye şikâyet ediyordu Miller 1998 yılındaki bir söyleşisinde. “Bunu neden tartışmamız gerektiğini dahi anlamıyorum.” Argümanlarını biyomoleküllerin kaynayan suda çözündüğü incelikli deneyler üzerine kurdular. Fakat bu basit çalışmalar ilkel yeryüzünün karmaşıklığını taklit etmekte başarısızdı; derin okyanusun aşırı ısı ve bileşim ölçüleri, volkan ağızlarının çalkantılı akış ve döngüsü, yoğun oranda mineral içeren deniz suyunun kimyasal karmaşıklığı ya da kayaların, bugün moleküllerin bağlı olduğunun bilindiği koruyucu yüzeyleri yoktu. Bununla beraber, kökenler sahası bugün Miller-Urey senaryosunun ötesine taşınmış durumda ve pek çok uzmana göre, yeryüzünün derin karanlık bölgeleri, bugün, biyogenez oyununda temel odak noktası.

Daha önce de sözünü ettiğim gibi enerji kaynakları ve karbon içeren küçük molekülleri olan *her* antik çevre, muhtemelen kendi payına düşen aminoasitleri, şekerleri, lipidleri ve yaşamın diğer moleküler yapı taşlarını üretmiştir. Yıldırımla süslenen ya da yoğun radyasyona maruz kalan bir atmosfer bir biyogenez kurasını olarak kalır; siyah dumanlar ve diğer derin, sıcak çevreler de öyle. Biyomoleküller asteroid darbeleri sırasında, atmosferin yüksek katmanlarındaki Güneş'te kavrulan toz zerrecikleri üzerinde ve uzayın derinliklerindeki, kozmik ışınlarla maruz kalan moleküller bulutlarda oluşur. 4,5 milyar yıldan uzun süredir olduğu gibi

her yıl organik olarak yoğun tonlarca toz, uzayın dışından Dünya'nın yüzeyine yağar. Bugün yaşamın yapı taşlarının evrene saçıldığını biliyoruz.

İkinci Adım: Seçim

Yarım yüzyıl kadar önce, kökenler araştırmasındaki en büyük güçlük ham maddelerin (yaşamın moleküler tuğlalarının ve harcının) sentezlenmesiydi. Yirmi birinci yüzyılın başında, bu sorun büyük oranda çözülmüştü; bilim insanları yeryüzünün yaşamın hayati içeriklerinin etkisi azalmış bir su ile kuşatılmış olması gerektiğini fark ettiler. Bugün odak noktası büyük oranda biobitlerin seçimi ve makromoleküllerde yoğunlaştırılması ve toplanmasına (hücreleri çevreleyen zarlara, kimyasal reaksiyonlarını destekleyen enzimlere ve bilgiyi bir nesilden diğerine aktaran genetik polimerlere) yöneldi.

Burada muhtemelen birbirini tamamlayan iki süreç rol oynuyordu. Bunlardan biri, uzatılmış bir moleküller grubunun (lipitlerin) anlık biçimde ilk hücreleri kapsülleyecek zarları oluşturacak şekilde bir araya geldiği öz toplanmadır. Lipitler bir düzine ya da daha fazla karbon atomunun cılız temelini oluşturur. Belirli koşullar altında, mikroskobik oyuk bilyeler şeklinde birleşme eğilimindedirler; uzatılmış moleküller, bir karahindiba başı üzerindeki tohumlar gibi yan yana sıralanır. Kökenlere ilişkin tarihteki en etkili yayınlardan birinde, Kaliforniyalı biyokimyacı David Deamer, bu çok yönlü organik moleküllerden bir grubu karbonun yoğun olduğu Murchison gök taşından nasıl çıkardığını ve sudaki küçük yağ damlarından farklı olmayan biçimde, hızla iç ve dış yüzeyleri olan hücreye benzer küçük dairelere dönüştüklerini keşfettiğini betimledi. Birkaç yıl kadar önce, Deamer ve ben sıcak, basınçlı siyah duman koşulları altında oluşan karbon-yoğun moleküllerin oldukça benzer şekilde hareket ettiğini gördük. Bunlar ve diğer deneyler, zara bağlı kabarcıkların prebiyotik dünyanın kaçınılmaz bir özelliği olduğunu ortaya koyar; lipit öz toplanması yaşamın kökenlerinde temel bir rol oynamış olmalıdır.

Diğer biyo-yapı taşlarının büyük bölümü kendi aralarında örgütlenmez fakat iki seçim sürecinden ikincisi olan kalıp yönelimli sentez denilen süreçte, kaya ve minerallerin güvenli, koruyucu yüzeylerinde yoğunlaşabilir ve dizilebilirler. Son on yıl içinde Carnegie Enstitüsü'nde yapılan deneylerimiz, yaşamın en hayati moleküler yapı taşlarından pek çoğunun, gerçek anlamda her doğal mineral yüzeye bağlandığını ortaya koyar. Aminoasitler, şekerler ve DNA ve RNA içerikleri, yeryüzünde bazalt ve granit olarak en sık görülen kaya oluşturan mineralleri (feldispat, piroksen, kuvars ve diğerlerini) yüzeysel olarak emer. Dahası, çeşitli moleküller aynı taşınmaz kristal parçası için rekabet ettiğinde, sıklıkla iş birliği içine girer ve bu işbirliği, kendilerine ait, daha da fazla yüzeysel emilimi ve bu daha fazla örgütlenmeyi destekleyebilecek karmaşık yüzey yapılarının oluşumuyla sonuçlanır. Prebiyotik okyanusun minerallerle etkileşime geçtiği her yerde, yaşamın moleküllerinin oldukça yoğun düzenlemelerinin şekilsiz sudan kaynaklanmış olabileceği sonucuna vardık.

Burada bir uyarıda bulunmalıyım. Yaşamın kökenleri araştırmasında (ve muhtemelen aynı zamanda başka pek çok disiplinde) bilim insanları kişisel bilimsel özelliklerini vurgulayan modellere yönelir. Organik kimyager Stanley Miller ve ekibi, yaşamın kökenlerini temelde organik kimyada bir sorun olarak görmüştür. Buna karşılık jeokimyacılar, ısı, basınç ve kimyasal açıdan karmaşık kayalar gibi değişkenler içeren daha girift köken senaryolarına odaklanma eğiliminde olmuştur. DNA ve RNA üzerinde çalışan moleküler biyologlar “RNA dünyası”nı yenilecek bir model olarak görürken, zar oluşturan lipit molekül uzmanları “lipit dünya”yı destekler. Virüsler, metabolizma, killer ya da derin biyosfer üzerinde çalışan uzmanların da kendilerine özgü ön yargıları vardır. Bunu hepimiz yaparız; hepimiz en iyi bildiğimiz şeye odaklanır ve dünyayı o mercekten görürüz.

Mineraloji alanında eğitimliyim, dolayısıyla ilk tercihlerimin hangi yönde olduğunu kolaylıkla tahmin edebilirsiniz. Mea culpa⁷.

7 (Lat.) Benim hatam. (ç.n.)

Başka pek çok köken araştırmacısı da bu türden bir sonuca varmıştır; bu gerçekten de önde gelen birkaç biyoloğun minerallere yönelttiğinden fazlasıdır, çünkü yalnızca okyanusları ve atmosferi içeren yaşamın kökenleri senaryoları, etkin moleküler seçim ve yoğunlaşma mekanizmalarının açıklanmasında aşılmaz güçlüklerle karşılaşır. Katı minerallerin molekülleri seçme, yoğunlaştırma ve örgütlenme konusunda benzersiz bir potansiyeli vardır. Dolayısıyla mineraller yaşamın kökenlerinde temel bir rol oynamış olmalıdır.

Sağ ve Sol

Biyokimya, iç içe geçmiş döngüleri ve moleküler reaksiyon ağlarıyla karmaşık bir bütündür. Anlaşılması güç şekilde katmanlandırılmış olan bu süreçlerin işlemesi için moleküllerin doğru boyut ve biçimlere sahip olması gerekir. Moleküler seçim her biyokimyasal iş için en iyi molekülü bulma görevidir ve mineral yüzeyler üzerindeki şablon güdümlü seçim, bugün doğanın bunu yapma biçiminin başat adayıdır.

Moleküler seçimdeki belki de en ürkütücü güçlük kiralite, yaşamın yaygın “el kullanma eğilimi”dir. Yaşam moleküllerinin büyük bir bölümü ikiz görüntü çiftleri olarak gelir; iki eliniz gibi sol ve sağ elli değişkenler olarak. Kiral molekül çiftleri pek çok açıdan benzerdir: Aynı kimyasal bileşimlere, aynı erime ve kaynama noktalarına, aynı renk ve yoğunluğa ve aynı elektriksel iletkenliğe sahiptirler. Fakat sol ve sağ elli moleküllerin, farklı, örtüşmeyen biçimleri vardır; bu, sağ elinize bir sol el eldiveni takmaya çalıştığınız olduysa bileceğiniz bir özelliktir. Hayat inanılmaz derecede seçici görünür: Hücreler neredeyse sadece sol elli aminoasitleri ve sağ elli şekerleri kullanır.

Kiralite önemlidir. Tuhaf suni limon özü kokusu söz konusu olduğunda, sağ elli form portakal gibi kokar, öte yandan bu basit daire biçimindeki molekülün sol elli versiyonu bir limon gibi kokar. Burnunuzun içindeki koku reseptörleri kiraliteye duyarlıdır, dolayısıyla sağ ve sol limon kokusu, beyninize biraz farklı sinyaller gönderir. Tat alma cisimcikleri sağ ve sol elli şekerler arasındaki

farklılıklara daha az duyarlıdır. Her ikisi de tatlıdır fakat bedenimizin ince ayarlı sindirim sistemi yalnızca sağ elli formları işletebilir. Sıfır kalori bir sol elli, şeker yerine geçen bir ürün olan suni tatlandırıcı olan tagatoz, bu özelliklerden yararlanır. Talidomitin trajik öyküsü de el kullanımına dayanır. Bu ilacın sağ elli versiyonu hamile kadınlarda sabah bulantısını hafifletebilir ancak kaçınılmaz olarak bunu izleyen sol elli tür, doğum kusurlarına yol açmıştır. Bugün FDA kiral açıdan saf ilaçlar için katı gereklilikler dayatmaktadır; bunlar hayat kurtaran fakat tüketiciler için ek üretim masrafları olarak yılda 200 milyar dolara mal olan düzenlemelerdir.

Miller-Urey ve hidrotermal deneylerin de dâhil olduğu biyomolekülleri sentezleyen deneylerin büyük bölümü eşit oranda sol ve sağ elli molekül üretir ve doğal süreçlerin büyük bölümü sol ve sağ elli moleküllere tam olarak aynı şekilde yaklaşır. Gerçekten de cansız doğal Dünya büyük oranda sol ve sağ arasındaki ayrıma kayıtsızdır. Fakat yaşam mutlak biçimde doğru şekli gerektirir: Sol elli aminoasitler ve sağ elli şekerler önemlidir. Zıt elli moleküller basit biçimde işe yaramayacaktır. Dolayısıyla araştırma ekibimiz yaşamın sol elli aminoasitleri neredeyse özellikle sağ elli olanlara ve sağ elli şekerleri sol ellilere nasıl tercih ettiği sorusunu ele almıştır.

Yakın zamanda yaptığımız deneylerde, kiral mineral yüzeylerin elli molekülleri seçmede ve belki aynı zamanda yaşamın kökenlerinde de başat rolü oynamış olma olasılığı irdelendi. 2000 yılında meslektaşlarımla birlikte, o dönemde şaşırtıcı olmakla birlikte bugün açık olan şeyi fark ettik: Kiral mineral yüzeyler doğada her yerdedir. Her kayada ve toprakta en sık görülen minerallerde, atomların molekül düzeyde, bazıları sol bazıları sağ “tutacaklar” oluşturduğu yüzeyler bol miktarda bulunur. Doğal dünyada, bu sol ve sağ elli mineral yüzeyleri, istatistiksel açıdan eşit oranlarda görülür, dolayısıyla Dünya küresel bir boyutta ne sol ne de sağ eğilimli görünmez. Fakat her molekül için ulaştığı nokta önemlidir. Deneyimlerimiz belirli sol elli moleküllerin bir grup kristal yüzey üzerinde toplanabildiğini, öte yandan ikiz görüntü, sağ elli benzer moleküllerin diğer mineral yüzeyleri grupları üzerinde aynı ölçüde

kolay biçimde toplandığını göstermiştir. Elli moleküller birbirinden ayrı ve yoğunlaşmış olduğundan, her yüzey moleküler seçim ve örgütlemeye küçük bir deney hâline gelir.

Kendi başına mineral ve moleküllerin olduğu bu türden hiçbir doğal deneyin yaşam oluşturmuş olması mümkün değildir. Fakat her biri molekül-yoğun organik sularla yıkanmış trilyonlarca mineral yüzeyini ele alın ve bu küçük doğal deneyleri yüz milyonlarca yıl boyunca sürekli tekrar edin. Dünya nihayetinde küçük moleküllerin gerçek anlamda her bileşimini bir yerlerde, bir dönemde test etmiş olmalıdır. Sonunda kendi içinde daha kolay toplandığı ya da mineral yüzeylere daha güçlü bir bağ geliştirdiği veya yüksek ısı ve basınçlar altında daha büyük bir istikrar sağladığı görülen tüm bu moleküler bileşimlerin küçük bölüntüsü, muhtemelen büyümek, yeni oyunlar öğrenmek üzere hayatta kalmıştır.

Henüz bu olası molekül ve mineral bileşimlerinden hangilerinin canlı bir örgütlenmeyle sonuçlandığını bilmiyoruz fakat moleküler seçim ve örgütlenmenin prensipleri şimdi ortaya çıkmaktadır. Biyomoleküller bol miktarda sentezlenmişti ve bu moleküllerden bazıları gittikçe daha büyük kümeler oluşturmayı sürdürdü. Deneylerimiz elektrik yükünün büyük bir rol oynadığını ortaya koyar. Bazı moleküllerin biraz pozitif bir yükü, diğerlerinin biraz negatif bir yükü vardır ve yine (su gibi) bazı diğerleri, aynı molekülün hafif pozitif ve negatif uçlarıyla kutupludur. Minerallerin de bazılarının pozitif, bazılarının ise negatif yüklü uçları vardır. Tüm bu yüklü parçaları bir araya getirdiğinizde, her zaman negatif elektrik yüküne bağlı olan pozitif elektrik yüküyle anlık biçimde örgütlenirler. Dolayısıyla çeşitli moleküler gruplar, prebiyotik yeryüzünde gerçek anlamda her ıslak, mineral-yoğun çevrede oluşmuştur.

Üçüncü Adım: Tekrar

Kimyasal dizilimler, ne kadar karmaşık bir şablona sahip olursa olsunlar, kendilerinin kopyalarını yapamadıkları sürece canlı değildir. Yaşamın en ayırt edici özelliği üremedir: Bir molekül birliği

iki, iki ise dört olur ve geometrik genişleme yoluyla bu şekilde devam eder. Biyogenez öyküsündeki en büyük gizem, kendini yenileyen moleküllerin, o ilk sistemin ortaya çıkışı olmayı sürdürür. O güvenilmez biyokimyasal oyunu henüz laboratuvarı bütünüyle taklit edememiş olsak da zekice deneyler inandırıcı üreme döngülerinin bölümlerini çoğaltır. Bununla beraber, mekân ve zamanda belirli bir noktada, düzenlenmiş bir moleküller seçkisi diğer moleküller (yani “yiyecek”) pahasına kendini çoğaltmaya başlamıştır.

Yeryüzünün beş yüz milyon yaşındaki hâlini düşünün; kabaca bundan dört milyar yıl önceki hâlini. Organik molekül karışımına, trilyonlarca reaktif mineral yüzeyine sahipti ve bunları biçimlendirmek için önünde yüzlerce milyon yıl vardı. Moleküler çevrenin büyük bölümü ilginç olan hiçbir şey yapmadı ve hiçbir yararlı işlev göstermedi. Fakat mineral yüzeyler üzerinde dizilen organik moleküllerin küçük bir bölüntüsü, gelişmiş bir işlevi olan bir tür yapı ortaya koydu; bu belki daha güçlü bir yüzey bağı, belki topluluğa daha fazla molekül çekme aracı, rekabet eden moleküler türlerin yıkımını katalize etme eğilimi, hatta kendi kopyalarını üretme becerisiydi. Doğal Dünya bu türden yenilikleri fazlasıyla ödüllendirir ve yaşam bir kez oluştuğunda yerkürenin yaşanılabilir her noktasını hızla istila etmiştir.

Fakat geriye doğru bir adım atalım. Bir moleküller bütünü neden bir anda kendini kopyalamaya başlasın? Cevap değişke ve seçimin ikiz evrimsel sütunlarında gizli. Sistemler iki nedenden ötürü gelişir. Öncelikle çok sayıda olası farklı biçimlenme düzeni ortaya koyarlar; bu değişkedir. İkincisi, bu biçimlenme düzenlerinden bazılarının varlığını sürdürme ihtimali diğerlerine göre çok daha fazladır; bu seçimdir. Her biri karbon, hidrojen, oksijen ve nitrojenden yapılan, belki içlerine biraz sülfür ya da fosfor atılmış olan yüzbinlerce farklı molekülün prebiyotik bir bütünü hayal edin. Prebiyotik sentez (Stanley Miller tarzında) ve doğal örnekler (örneğin David Deamer'ın gök taşı) bu moleküler değişke oranını ortaya koyar. Fakat tüm moleküller eşit biçimde oluşmamıştır. Bazı moleküller görece istikrarsız ve ayrıştırılmıştır; yarıştan hızla çıkarılmışlardır. Diğerleri faydasız katranımsı kütleler hâlinde

kümelenmiş ve yüzerek uzaklaşmış ya da başka bir rol oynayamayacakları okyanus zeminine çökmüştür. Fakat bazı moleküllerin özellikle sabit olduğu, belki kendi türlerinden başkalarına ya da özellikle cezbedici bir mineral yüzeyine bağlanabildiklerinde bunun daha da fazla geçerli olduğu ortaya çıkmıştır. Bu moleküller varlıklarını sürdürmüştür, çünkü moleküler karışım en az uygun olandan yalıtılmıştır.

Moleküler etkileşimler prebiyotik karışımı daha da incelikli hâle getirmiştir. Bazı molekül grupları iş birliği hâlinde mineral yüzeylerine yapışmış, böylelikle grubun hayatta kalmasını sağlamıştır. Diğer küçük moleküller katalizör işlevi görmüş, kimyasal bağların oluşumunu destekleyerek ya da kimyasal bağların kırılması yoluyla diğer kimyasal türlerin yıkımını hızlandırarak bazı kimyasal türleri geliştirmişlerdir. Moleküler karışım hızla savruldu fakat böylesi bir dünyada nihai güvenlik, rekabetin yok edilmesinde ya da sadece direnmekte bulunamazdı. Hayatta kalmanın nihai ödülü, kendi kopyalarını yapmayı öğrenen moleküller seçkisine gidecekti.

Rekabet eden üç model kendini çoğaltan, sözde yaşayan ilk moleküller sistemini betimleme çabası içindedir. Bu modellerin en basitleri (dolayısıyla pek çoğumuzun tercih ettiği model) birkaç küçük molekülün bilinen döngüsüne işaret eder; yaygın sitrik asit döngüsüne. Bu, yalnızca iki karbon atomu içeren asetik asitle başlar. Asetik asit, (üç karbon atomlu) pirüvik asidi oluşturacak biçimde CO_2 ile tepki verir; sonuç olarak bu da dört-karbonlu okzaloasetik asidi oluşturacak biçimde, daha fazla CO_2 ile tepki verir. Diğer tepkiler, altı karbon atomu bulunan sitrik aside kadar kademeli olarak daha büyük moleküller üretir. Sitrik asit aynı anda daha küçük iki moleküle, yine moleküler döngünün birer parçası olan asetik aside (iki karbon atomu) ve okzaloasetik aside (dört karbon atomu) bölündüğünde kendini çoğaltır duruma gelir. Dolayısıyla bir moleküller döngüsü iki, iki döngü dört döngüye dönüşür. Dahası, yaşamın, aminoasit ve şekerlerin de içinde olduğu önemli yapı taşlarından pek çoğu, sitrik asit döngüsünün öz moleküllerinin basit reaksiyonlarıyla hemen sentezlenir. Örneğin pirüvik aside amonyak eklerseniz önemli aminoasit alanini elde edersiniz.

Dünya'da yaşayan her hücre, sitrik asit döngüsünü içerir, dolayısıyla bu ilksel bir özellik, ilk yaşam formundan gelen kimyasal bir fosil olabilir. Bu türden bir döngü, kendi başına canlı değildir. Fakat daha az verimli kimyasallar pahasına, moleküllerin iç grubunu çoğaltma potansiyeline sahiptir.

Kimyasal karmaşıklığın diğer zıt ucunda kendini çoğaltan kendi kendini yenileyen ağ yer alır; bu ünlü Santa Fe Enstitüsü'nde öncü kuramsal çalışmaları yürüten Stuart Kauffman'ın savunduğu bir modeldir. Prebiyotik karışım, başlangıçta, çeşitli kaynaklardan yüzbinlerce farklı türde küçük, karbon temelli molekülü birleştirmiş olabilir. Bugün bu kimyasallardan bazılarının yeni moleküller üreten reaksiyonları katalize ettiğini, öte yandan diğer reaksiyonların komşularının çöküşünü hızlandırdığını biliyoruz. Kendi kendini yenileyen bir ağ, ağ içinde bulunmayan tüm molekülleri tahrip ederken kendi üretimlerini hızlandıran bir moleküller grubunu da (belki uyum içinde işleyen binlerce farklı tür) içerir. Bu “zenginlerin daha da zenginleşmesinin” moleküler eş değeridir. Yine, kritik asit döngüsü için geçerli olduğu gibi bu türden bir moleküller ağ, canlı olarak kabul edilmezdi fakat bir şekilde kendi çoğaltımını destekler ve cansız kimyasal sistemlerin büyük bölümünden çok daha karmaşıktır.

Muhtemelen biyolojik açıdan eğitilmiş köken araştırmacılarının büyük bölümünün benimsediği üçüncü bir senaryo, RNA dünyasıdır; bu kendi kopyalarını üreten varsayımsal bir RNA molekülü üzerine kurulu bir modeldir. Bu senaryonun neden cazip olduğunu anlayabilmek için geriye doğru bir adım daha atmamız ve yaşamın en kritik iki işlevi hakkında düşünmemiz gerekir: Metabolizma (nesnelerin üretimi) ve genetik (nesnelerin nasıl üretileceğine ilişkin bilginin bir nesilden diğerine aktarımı). Modern hücreler daha fazla protein üretmek amacıyla gerekli olan bilgiyi depolamak ve kopyalamak için merdivene benzeyen DNA molekülünü kullanır fakat DNA üretmek için karmaşık biçimde kıvrımlı protein moleküllerini kullanırlar. O hâlde hangisi daha öncedir, DNA mı yoksa proteinler mi? Üçüncü bir molekül türü olan RNA'nın, her iki süreçte de başat bir rol oynadığı görülür.

RNA ince bir polimerdir; nükleotidler denilen, bir ipin üzerindeki boncuklara ya da cümledeki harflere benzeyen daha küçük tekil moleküllerden koparılan uzun, tek zincirli bir molekül. A, C, G ve U olarak gösterilen dört farklı molekül “harf” hayal edilebilecek her türlü sırada, kodlanmış bir mesaj gibi dizilebilir. Gerçekten de bu RNA harfleri (tıpkı DNA gibi) genetik bilgiye sahiptir. Aynı zamanda, RNA (tıpkı proteinler gibi) temel biyolojik reaksiyonları katalize etme becerisine sahip karmaşık biçimler alabilir. Aslında, RNA molekülüleri, hem genetik bilgiyi taşıyarak hem de protein oluşumunu katalize ederek tüm proteinlerin sentezini kolaylaştırır. Dolayısıyla, yaşamın çeşitli molekülüleri arasından, RNA “tümünü başarır” gibi görünen tek moleküldür.

RNA Dünya modeli, henüz iyi anlaşılmayan bazı kimyasal mekanizmaların çok sayıda farklı RNA dizileri ya da belki buna oldukça benzer bilgi-yoğun bir molekül ürettiği varsayımına dayanır. Bu farklı dizilerin neredeyse tamamı, kelimenin tam anlamıyla hiçbir şey yapmamıştır; yalnızca varlıklarını sürdürmüş ya da kademeli olarak gerilemişlerdir. Ancak seçilmiş birkaç dizi, kendine fayda sağlama yönünde bir tür işleve sahipti; daha sabit hâle gelecek biçimde kıvrılıyor, güvenli bir mineral yüzeyine bağlanıyor ya da belki rakiplerini yok ediyorlardı; bu sudaki molekülüer rekabetin bir diğer örneğiydi.

RNA Dünya hipotezinin temel varsayımı, çok sayıdaki bu dizilerden birinin, kendi kopyalarını nasıl üreteceğine ilişkin şaşırtıcı oyunu öğrendiğiydi: Kendini çoğaltan bir moleküle dönüşmüştü. Bu fikir fazla zorlama değildir. Ne de olsa RNA, kendi kopyalarını üretebilen DNA’ya oldukça fazla benzer. Dahası, RNA kolaylıkla mutasyona uğrayabilir. Dolayısıyla, kendini kopyalayan ilk RNA molekülü, her ne kadar etkisiz ya da özensiz olursa olsun, çok geçmeden kendisini, biraz farklı olan çok sayıdaki değişkeniyle rekabet hâlinde bulacaktı; bunlardan bazıları kopyalama oyununu biraz daha hızlı biçimde, biraz daha az enerji sarf ederek ya da belki biraz farklı çevrelerde kotarmıştı. Bu kadar erken gelişmiş bir RNA molekülü yaşamın tüm gerekliliklerini yerine getirir gibi görünür: Yeniliği ve süregelen Darwinci evrimi (bu bağlamda,

moleküler evrimi) birleştirme kapasitesine sahip, kendini idame ettiren bir kimyasal sistemdir.

Belki de ister sitrik asit döngüsü ister kendi kendini yenileyen bir ağ ya da kendini çoğaltan bir RNA olsun, bu ilk işlevsel, kabaca kendini yenileyen moleküler sistemin ortaya çıkması uzun zaman almıştır. Fakat akıl almaz sayıda moleküler bileşim, trilyonlarca mineral yüzey üzerinde, neredeyse Dünya yüzeyinin üç yüz yirmi milyon kilometrekarelik bir alanında, milyonlarca yıldır deneni-yordu. Bu inanılmaz derecede çok sayıdaki moleküler bileşimden biri de bir yerlerde, bir dönem işe yaramıştır. Kendini yenilemeyi ve geliştirmeyi öğrenmiştir. Bu buluş her şeyi değiştirmiştir.

Harvard'lı biyolog Jack Szostak'ın Boston merkezli laboratu-varında yapılan deneyler, seçimin moleküler evrimdeki gücünü ortaya koyar. Szostak'ın ekibinin pek çok deneyi, her biri A, C, G ve U harflerinin, yüz harflik rastlantısal bir dizilimini içeren yüz trilyon farklı RNA sıralanımının bir karışımıyla başlar. Her biri farklı şekillerde katlanan bu dev RNA dizileri, sonrasında bir gö-revle karşı karşıya kalır: Örneğin farklı olarak biçimlendirilmiş bir başka moleküle sıkıca bağlanmak. Szostak'ın ekibi yüz trilyon dizi-nin tümüyle birlikte, her biri o farklı şekilde biçimlendirilmiş hedef molekülle kaplı küçük cam boncuklara bir çözelti döker. Bu hedef molekülle, RNA-yoğun çözeltinin içine küçük çengeller gibi sar-kar. RNA molekülünün büyük bir bölümü cevap vermez; farklı şekillerle etkileşime girerler. Fakat kıvrılan RNAların küçük bir miktarı hedefleri ele geçirir ve onlara sıkıca tutunur.

Eğlence tam da burada başlar, çünkü Szostak'ın çalışma arka-daşları eski çözeltiyi (işlevsel olmayan yaklaşık yüz trilyon farklı RNA dizisiyle birlikte) boşaltır ve rastlantısal şekillerine paralel olarak kaplanmış cam boncuklara yapışan birkaç diziyi kurtarır. Daha sonra, inandırıcı prebiyotik süreçleri taklit eden standart ge-netik teknoloji oyunlarını kullanarak, yüz trilyon RNA dizisinden oluşan yeni bir grup hazırlarlar fakat bu kez tüm diziler çamurlu kopyalardır; her biri o birkaç özgün işlevsel dizinin bir mutasyo-nudur. Yukarıdaki adımların tekrarlanması, yeni bir işlevsel RNA dizileri popülasyonu oluşturur fakat bu ikinci nesil değişkenlerden

bazıları, ilk neslin herhangi bir üyesinden çok daha iyi biçimde bağlanır. Mutant kız ürün dizilerinden bazıları ebeveynlerini gözle görülür biçimde aşar. Tüm süreci birkaç kez daha tekrarladığınızda, sonuçta ortaya çıkan RNA dizileri, bağlayıcılıkta gittikçe daha iyi hâle gelir, ta ki en iyi mutantlar kusursuz biçimde işlevsel olana dek: Olası en yüksek bağlayıcı enerjiyle hedeflerine kilitlenirler.

Deneyin tamamı birkaç gün alır; rastlantısal dizilerden kusursuz bağlayıcı bir moleküle dek geçen süre bir haftadan kısa sürer. Fakat dünyanın en parlak kimyagerlerinden bu türden işlevsel bir RNA dizisini en baştan tasarlamasını isteyecek olsaydınız, bu görevin, bilinen herhangi bir hesaba dayalı yöntemle hayata geçirilmesinin gerçekten imkânsız olduğunu düşünürlerdi. Mevcut hiçbir yöntem uzun bir RNA dizisinin tam olarak nasıl katlanacağını ya da karmaşık biçimde şekillendirilmiş diğer moleküllere nasıl bağlanabileceğini öngöremez. İşlev elde edilmesine yönelik bugüne kadar görülmüş en hızlı ve en güvenilir yol, akıllı tasarım değil moleküler evrimdir. (Bu yüzden, Tanrı yaşamı yarattıysa, evrimi kullanacak kadar zeki olduğunu söyleriz.)

Yaşamın Patlaması

Prebiyotik karışımda, en küçük faydalı işlevi olan bir moleküller topluluğunun bile bir avantajı vardı. Fakat bu moleküler savaş oyunları, RNA dizisine sunulan, faydalı bir işlevi olan ve kendi kopyalarını üretebilen avantajın yanında sönük kalıyordu. Kendini yenileyen bu türden bir molekül, aşağı yukarı aynı kız ürünleri üreterek varlığını sürdürmeyi garantiliyordu. Dahası, moleküler kopyalama süreci kaçınılmaz olarak karmaşıktı, dolayısıyla bu RNA kopyalarından bazıları mutanttı. Mutasyonların büyük bölümü ölümcül olsa da ve gözle görülür hiçbir avantaj sunmasa da birkaç şanslı birey ebeveynlerini gölgede bırakıyor ve sistem bu şekilde geliyordu. Kendini yenileyen özgün molekül, sadece şans eseri, hataları kopyalayarak daha uç noktalarda basınç, sıcaklık ya da tuz koşullarını tolere eden ürünler vermiş, yeni yiyecek kaynakları bulmuş ya da daha az uygun olan komşularını yok etmiş

olmalıdır. Mineral bir yüzeyde korunma şansı ya da güvenli, kapsayıcı bir zarın içine sığınan RNA dizileri daha da büyük avantajlar sağlıyordu.

Rekabet olmadığında, kendini yenileyen ilk moleküller yeryüzünün besin maddeleri açısından zengin bölgelerini, jeolojik bir anda içine çekiyordu. Mikroskobik bir objenin üstün geldiğini düşünmek belki de mantığa aykırıdır fakat diyelim ki kendini yenileyen görece etkisiz ilk molekülün bir kez kopyalanması bir hafta almıştır. (Buna karşılık pek çok modern mikrop birkaç dakika içinde çoğalabilir.) Haftalar geçtikçe iki dizi dört, dört dizi sekiz olmuş ve süreç bu şekilde devam etmiştir. Bu oranda, kendini yenileyen yüz milyon molekül (çıplak gözle görülebilecek kadar büyük bir obje) oluşturmak yaklaşık altı ay sürerdi. Yirmi hafta daha geçtiğinde, RNA kütlesi, bir yüksüğü dolduracak kadar genişlerdi. Bu oranda da yaşamın tüm ilk belirtilerinin iri bir küveti doldurması, yirmi hafta daha alırdı.

Fakat her hafta süren katlanma hızla gözle görülür bir dönüşüm oluşturunurdu. Yirmi hafta daha geçtiğinde, muhtemelen sahil boyunca ya da bir iç gölde veya derin deniz çevresinde, RNA ile kuşatılmış kilometrelerce su görülürdü. Tek bir ilk RNA dizisinin her hafta ikiye katlandığı varsayılırsa iki yıl içinde de Dünya bir milyon kilometreküp canlıya sahip olmakla övünebilirdi; bu tüm Akdeniz'i doldurmaya yetecek bir miktardı.

Kayaların kimyasal enerjisiyle beslenen tek hücreli ilkel organizmaların yeryüzünün jeolojisi -örneğin kayalarının yüzeye yakın dağılımı ya da minerallerinin çeşitliliği- üzerinde çok fazla etkisi olamadı. Canlı ya da değil, bundan dört milyar yıl kadar önce antik toprak çorak, kara ve gri, yüzey bozunması ağırdı ve ilk yaşam, yerküreyi kaplayan mavi okyanusları değiştirecek hiçbir katkı sağlamıyordu.

Atıklardan oluşan ilk mikroplar çok az iz bıraktığından, yaşamın ne zaman başladığını kesin olarak söyleyemeyiz. Yeryüzünün en eski tortul kayalarından bazıları, yaklaşık 3,5 milyar yıl

kadar önce sığ okyanus çevrelerine bırakılanlar, tartışmasız biçimde mikrobik fosiller içerir. Birkaç santimetreden birkaç metreye uzanan kubbemsi kayalıklı stromatolitler, hücre kolonilerinin sığ ortamlarda ince koloniler hâlinde yoğunlaştığı yerlerde oluşmuştur. Mikrobik matlar geniş kıyı şeritlerini kaplamış kumu gelgit kuşakları hâlinde güçlendirmiş ve şekillendirmiştir. Hücre benzeri duvarları (olası mikrobik beden fosilleri) olan karbon-yoğun birkaç alan bile uzun süre varlığını korumuştur. Fakat daha eski, geçerliği kesin hiçbir fosil bulunmamıştır. 3,85 milyar yaşındaki oldukça başkalaşmış kayalarda bulunan karbon ve diğer biyoelementlerin jeokimyasal izleri oldukça caziptir fakat jeolojik topluluğu hiçbir şekilde ikna edememişlerdir.

O hâlde yaşam ne zaman ortaya çıkmıştır? Şayet önseziniz yaşamın erken bir evrede ve sıklıkla yaşanılabilir herhangi bir gezegen ya da uydu üzerinde doğduğu yönündeyse, belki de 4,4 milyar yıl kadar önceki (yeryüzünün ilk 150 milyon yılı içindeki) sabit bir biyosferi savunurdunuz. Tüm bileşenler mevcuttu: Okyanuslar ve hava, mineraller ve enerji. Asteroid ve kuyruklu yıldızların dev darbeleri bu Hadean yaşamın varlığını sürdürmesine meydan okuyacak, belki okyanus zeminin altındaki korunaklı kayalıklı evlerde, sıcak ve derinlerde yaşamayı öğrenen o güçlü hücreleri destekleyecekti. Belki de Dünya daha sakin ergenlik sonrası dönemine girmeden önce, yaşam birden fazla kez, belki de pek çok kez oluşmuştu. Şayet durum buysa, 3,5 milyar yaşındaki fosiller yaklaşık olarak bir milyar yıl boyunca oluşum sürecinde olan bir ekosistemi temsil edecekti.

Öte yandan yaşamın kökenlerinin zorlu olduğundan ve evrende nadir bulunduğundan kuşkulananacak olursanız, 3,5 milyar yıla yakın bir tarih daha olası görünebilir. Belki de yaşam, yüz milyonlarca kilometreküp okyanus kabuğu boyunca mineral-molekül etkileşimlerinin gerekli olacağı kadar beklenmediktir. Belki de Arkeyan Devir'in o değerli, nadir görülen fosil kalıntıları biyosferin gerçek ilk adımlarına işaret etmektedir.

Canlı Dünya

Yaşam, 4,4 milyar yıldan önce ya da 3,8 milyar yıl öncesinden sonra, ne zaman ortaya çıkmış olursa olsun şu gerçek sabit kalır: Yaşam, Dünya'nın antik yüzeyini çok az değiştirmiştir. O ilk mikropolar basit biçimde Dünya'nın hâlihazırda bildiği kimyasal oyunları öğrenmiştir. Gezegenimizin ilk günlerinden itibaren, kimyasal reaksiyonlar katı yüzeyinde ya da buna yakın bir noktada gerçekleşmiştir. Bunun nedeni elektronların dağılımına indirgenir: Yer yüzünün mantosundaki atomlar, ortalamada, kabuktaki atomlara göre kimyasal reaksiyonlara girecek biçimde dengelenmiş daha fazla elektrona sahiptir. Kimya jargonuyla, manto daha “indirgenmiş” ve yüzey daha fazla yükseltgenmiştir. İndirgenmiş ve yükseltgenmiş kimyasallar buluştuğunda (örneğin mantodan indirgenmiş magma ve gazlar daha yükseltgenmiş yüzeyi volkanik bir patlamayla yardığında) sıklıkla enerjiyi açığa çıkaran kimyasal bir reaksiyon gösterirler. Bu süreçte, elektronlar ilkinden ikincisine aktarılır.

Demirin oksijenle birlikte reaksiyon gösterdiği paslanma, bu türden bir reaksiyonun bilindik bir örneğidir. Demir metali, elektronlarla doludur; elektron sayısının, bazılarının parlak metalde gezinmekte ve elektrik iletmekte özgür olacağı kadar fazla olduğunu hatırlayacaksınız. Dolayısıyla demir bir elektron vericidir. Öte yandan oksijen gazında, elektronlar o kadar az bulunur ki oksijen atomu çiftleri, kaynaklarını, her iki atomun da elektronların sınırlı arzını tıpkı ıssız bir ada üzerindeki yiyecek hakkı gibi paylaşacağı bir O₂ molekülü oluşturmak için toplaması gerekir. Oksijen ideal elektron alıcısıdır. Dolayısıyla demir metali oksijen molekülleriyle karşılaştığında, hızlı bir elektron alışverişi gerçekleşir. Her oksijen atomu iki elektron alırken her demir atomu iki ya da üç elektrondan vazgeçer. Bu alışverişin sonucu yeni bir kimyasal bileşim, demir oksit, yanı sıra küçük bir enerji sarsıntısıdır.

Demirin yanı sıra, yoğun miktarda elektron içeren yaygın metal elementler nikel, manganez ve bakır da oksidasyona maruz kalmıştı. Metan, (doğal gaz) propan ve bütanın da aralarında olduğu

prebiyotik süreçlerle sentezlenmiş basit karbon temelli moleküllerin pek çoğu için de aynı şey geçerliydi. Oksijen gazı Dünya'nın ilk atmosferinde nadir olarak görülüyordu fakat sülfat, (SO_4) nitrat, (NO_3) karbonat, (CO_3) ve fosfatın (PO_4) da aralarında bulunduğu diğer fazlaca elektron alan atom toplulukları da bu rolü hemen üstlenebilirdi.

Yaşamın doğuşundan önce, redoks tepkimeleri görece yavaş bir hızda ilerledi. Fakat ilk mikroplar elektronları artan bir oranda karıştırmayı öğrendi. Pek çok yerde (ilksel sahillerde, yüzeye yakın sularda, okyanus dibi tortularında) yaşayan hücreler bu reaksiyonların aracılara dönüştü. Mikrop toplulukları, kayaların reaksiyon oranlarını hızlandırarak, ortaya çıkan enerjiyi yaşamak, büyümek ve üremek için kullanarak yaşamlarını sürdürüyorlardı. Elbette Dünya başından beri demir oksitler üretmişti fakat ilk mikroplar bunları daha hızlı biçimde oluşturmıştı. Bu süreçte yaşam, oldukça yavaş biçimde Dünya'nın yüzeyini değiştirmeye başladı. Mikroplar, Hadean ve Arkeyan okyanuslarında çözülen indirgenmiş demir formunda mevcut fazla enerjiden faydalandı; paslı kırmızı mineral hematit oluşturmak için demiri oksitlediler; bu bütün bir ekosistemi desteklemeye yetecek kadar enerji salabilecek kimyasal bir dönüşümdü. Dolayısıyla, Avustralya, Güney Afrika ve diğer antik bölgelerde bulunan, Arkeyan Devir'e ait iri demir oluşumları on milyonlarca yıl süren epik mikrobik bir darbenin kalıntılarını temsil edebilir. Böylelikle geosfer ve biyosferin şaşırtıcı ortak evrimi başladı.

Evrin, doğal seçim yoluyla tüm bu süreçleri yönlendirmeyi sürdürdü. Kendi demir kaynağını daha etkin biçimde kullanmayı, daha uç noktadaki koşulları tolere etmeyi ya da yeni redoks tepkimelerinden yararlanmayı öğrenen bir mikrobik türün gözle görülür bir avantajı oluyor ve varlığını sürdürmeyi garantiliyordu. Sonuç olarak mutasyona uğrayan mikrop popülasyonları, bu enerji üreten reaksiyonları cansız çevreden daha etkin biçimde destekleyen yeni katalizörler icat etti. Sonuçlar, yüzeye yakın karbon, sülfür, nitrojen ve fosforun işlenmesindeki kademeli artışın yanı sıra, farklı yerlerde küçük kireç taşı yığınlarının ve sade demir

oksit çökeltilerinin oluşmasıydı. Bununla beraber, bu ilk yaşam formları hâlihazırda, daha önce cansız dünyada (daha yavaş olsa da) başlamış olan kimyayı taklit etmekten ancak biraz daha fazlasını yaptılar.

Işık

Pek çok köken araştırmacısı, ilk yaşam formlarının bütünüyle kayaların kimyasal enerjisine dayandığından kuşkulandır; bu elbette verimli fakat yaşamın gelişebileceği yerleri büyük oranda sınırlayan bir kaynaktır. Bir noktada, birkaç mikrop, çevrelerine özgü kimyasal reaksiyonların aracıları olarak rollerinin ötesine geçmiştir. Gezegenin herhangi bir yerinde, yüzey üzerinde yaşayan herhangi bir canlı için bol miktarda, ucuz enerji kaynağı sunacak Güneş radyasyonunu toplamayı öğrenmişlerdir.

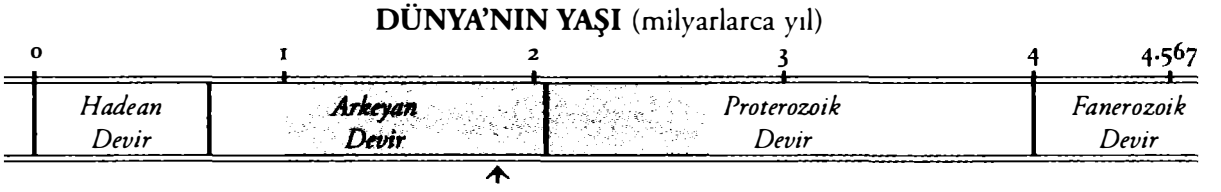
Fotosentez, en temel formunda, karbondioksit, nitrojen ve su gibi yaygın ham maddelerden biyomoleküller üretmek için Güneş ışığını kullanır. Doğru kimyasal çatı olduğunda, yaşamın tüm temel yapı taşları (aminoasitler, şekerler, lipidler ve DNA ve RNA'nın bileşenleri) atmosfer gazları ve Güneş ışınlarından oluşturulabilir. Modern yeşil su yosunlarından farklı olarak, bu ilk mikrobik fotosentez üreticileri hiç oksijen oluşturmamıştır. Gerçekten de bu ilkel organizmaların modern benzerleri, durgun göller üzerinde kahverengimsi ya da morumsu cüruf oluşturma eğilimindedir. Hatta bazı biyologlar, fotosentez mikroplarının yüzen dev salları'nın mavi Arkeyan okyanuslarını nahoş kahverengimsi-mor lekelerle bezeyerek dönüştürdüğünü öne sürmüştü.

Nasıl bilebiliriz? Bu türden mikropların fosil olarak korunacak zorlu parçaları yoktur; yüzen su yosunu düğümleri de kaya kayıtlarını gözle görülür herhangi bir biçimde değiştirmez. Ancak en antik, ışık seven mikropların kanıtlarını açığa çıkarmanın bir yolu olabilir. Siyanobakteri denilen fotosentez hücreleri kısmen hopanoidlere (kenetlenen beş karbon halkası olan farklı moleküllere [bugünlerde spor haberlerinde çokça yer alan] steroidlerle yakından ilişkili bir yapıya) dayanır. Mikroplar öldükten ve bozunduktan

sonra, sahte çok halkalı hopanoid omurgaları, milyarlarca yıl boyunca, ince kumlu okyanus tortularında moleküler bir tortu olarak varlığını sürdürebilir. Hopanoidlerin bu kalıntılarının çıkarılması ve analiz edilmesi için incelikli bir kimyasal işleminden geçirilmeleri gerekir. Belirsiz yorumlar hem antik hem de yakın zamana ait olası bulaşım kaynaklarını birleştirmelidir. Paleontolojik topluluk milyarlarca yıl boyunca varlığını sürdüren her molekül raporunu, dolaysız kuşkuculukla değilse de ihtiyatla karşılar. Bununla beraber, kimyasal izler yerindedir ve bu belli belirsiz antik atmosfere açılan en iyi pencere olabilir. (Bunun nasıl olacağına ilişkin daha fazla bilgi, yedinci bölümde yer almaktadır.)

Gezegeneimizin bir milyarıncı doğum gününde, yaşam yüzeyinde görece önemsiz olsa da sağlam bir dayanak inşa etmişti. Bir milyar yıl kadar daha, yeryüzünün mikrobik yaşamı, önce redoks tepkimeleriyle hızlanarak ve sonra fotosentez yoluyla, yüzeye yakın çevreleri usulca dürtecekti. Bilebildiğimiz kadarıyla, Dünya, iki milyar yaşındayken bile yüzeyinde ya da yüzeyine yakın bir noktada, yaşam belirtisi içeren herhangi bir mineralojik yenilik göstermiyordu. Hücreler basitçe, farklı koşullarda oluşabileceğinden daha fazla demir oksit, kireç taşı, sülfat ve fosfat içerir. Okyanusun derinliklerinde, katmanlı demir-yoğun mineraller oluşturur ve sık kıyılarda koruyucu kayalıklı tümsekler yaparlar; bunların tümü, yaşamın doğuşundan önce Dünya ve Güneş Sistemi'ndeki diğer gezegenler ve uydular üzerinde ortaya çıkan olgulardır.

Fakat Dünya ve onun ilkel mikrobik popülasyonu gezegenin tarihindeki en dramatik dönüşümü gerçekleştirmek üzere dengeleşmiştir. Bunu izleyen 1,5 milyar yıl içinde, fotosentez yapan mikroplar yeni bir kimyasal oyunu, oksijen denilen yüksek ölçüde reaktif, tehlikeli biçimde aşındırıcı olan gazı yaymayı öğrenecekti.



Yedinci Bölüm

Kırmızı Dünya

Fotosentez ve Büyük Oksitlenme Olayı

Dünya'nın Yaşı: 1 ila 2,7 milyar yıl arası

Bugüne doğru hızla ilerlendiğinde yaşamın Dünya'nın yüzeye yakın çevresini (en dikkat çekici biçimde okyanusları ve atmosferi ama aynı zamanda kayaları ve mineralleri de) dönüştürmüş olduğu netlik kazanır. Bu türden bir dönüşümün, yaşayan ilk hücrenin getirdiği yenilikten sonra başlaması, bir milyar yıldan uzun zaman alırdı. Bu süre içinde, yeni mikrop çeşitleri bazı kıyı bölgelerinde kahverengimsi ya da morumsu bir köpük oluşturmuş olabilir. Hatta Ekvator kıyılarını süsleyen ve sığ göletleri dolduran yeşilimsi çamur parçaları olabilir, tıpkı birkaç akıllı hücrenin Güneş'in parlak enerjisini dizginlemenin yeni yollarını deneyimlemesi gibi. Fakat kıtalar hâlâ çoraktı: Kayalıklı doğada hiçbir bitki tutunamıyordu ve onları yiyecek herhangi bir hayvan da yoktu. Bu oksijensiz dünyada kalsaydınız, yine hızla, acı içinde ölürdünüz.

Dünya'nın yüzeyi, oksijen üreten fotosentezin getirdiği yenilikle ve bunun sonucunda oksitlenen atmosferin yükselişiyle donuk griden tuğla kırmızısına dönmüştür. Balçıklı yeşil su yosununun, Büyük Oksitlenme Olayı denilen bu dönüşümü, tam olarak ne zaman ve hangi hızda tetiklediğini tam olarak belgelemek güçtür. En iyi tahminimizde, kayanın tarihindeki, Dünya'nın iki milyarını

doğum gününden hemen sonra (yaklaşık 2,5 milyar yıl kadar önce) gerçekleşen algılanması güç değişikliklere dayanırız. Bu sade başlangıçtan sonra, her şey görece hızlı biçimde olmuştur: 2,2 milyar yıl öncesine gelindiğinde, atmosferdeki oksijen sıfırdan bugünkü düzeyinin yüzde birden fazlasına yükselmiş, Dünya'nın yüzeyini sonsuza dek değiştirmişti.

Dünya'nın ilk oksijenlenmesinin etkileyici öyküsü ancak bugün, beklenmedik yeni ipuçlarının ortaya çıkması ve umut verici yeni kanıtların izinin ciddiyetle sürülmesiyle aydınlanıyor. Son yarım yüzyıl içinde gerçekleştirilen paleoatmosfer araştırmalarında, rekabet hâlinde, bazen birbirine taban tabana zıt pek çok fikir görülmüştür fakat bilimsel yöntem, savunulamaz ve yanlış olanın harika bir açıklayıcısıdır. Henüz elimizde hikâyenin tamamı bulunmamakla birlikte, ona çok daha fazla yaklaştık ve ortaya çıkan resim (kelimenin tam anlamıyla) nefes kesici.

Kayaların Tanıklığı

Büyük Oksitlenme Olayı'nın kanıtı, kayalar ve mineraller üzerinde, Dünya tarihinin büyük bir bölümüne (kabaca 3,5 ila 2 milyar yıl öncesine) dayanan, artış gösteren bir gözlemler listesine uzanır. Bir yandan, 2,5 milyar yaştan üzerindeki pek çok kaya, oksijenin yıpratıcı etkileriyle kolaylıkla zarar gören mineraller içerir ve bu durum, bu dönemin öncesinde oksijenden bağımsız bir çevre olduğuna işaret eder. Jeologlar antik akarsu yataklarında (bugünün oksijen yoğun yüzey çevresinde bu türden minerallerin hızla aşınacağı ve bozulacağı yerlerde) bozunmamış ve yuvarlak pirit çakılları ("ahmak altını" olarak da bilinen demir sülfat) ve uraninit (en sık görülen uranyum minerali) bulurlar. Bu türden antik kumlu katmanların aynı zamanda ele verici bir kimyası vardır; seryum gibi oksijenden sakınan elementlere sıra dışı biçimde odaklanırken, bugünün topraklarıyla karşılaştırıldığında demir gibi diğer türler açısından çarpıcı ölçüde yetersizdir. Bu kimyasal gariplikler, oksijenden yoksun bir atmosferi daha da açık biçimde gösterir.

Buna karşılık, 2,5 milyar yıldan daha genç kayalar, pek çok açık oksijen belirtisi içerir. 2,5 ila 1,8 milyar yıl öncesi tarih aralığında, damarlı demir oluşumları denilen büyük demir oksit tortuları şaşırtıcı oranda birikiyordu. Değişen siyah ve paslı kırmızı katmanların bu farklı, yoğun birikintileri, dünyanın bilinen demir maden rezervlerinin yüzde doksanını içerir. Mangan oksitler de birdenbire ortaya çıkar, tıpkı bugün dünyanın başat mangan madeni kaynaklarını sağlayan kalınca katmanlı tortular gibi. Başka yüzlerce yeni mineral (oksitlenen demir, nikel, uranyum madenleri ve daha fazlası da) Büyük Oksitlenme Olayı'ndan sonra ilk defa kaya kayıtlarında yer alır. Ancak bu genişletilen mineralojik repertuara karşın, bazı bilim insanları, Büyük Oksitlenme Olayı'nın gerçekten de bir olay olup olmadığı konusunda ikna olmamışlardır. Belki de atmosferin oksijeninde yalnızca ağır ve düzenli bir artış vardı. Belki de lekeli, aşınmış kayanın tarihi tamamlanmamış ve yanıltıcıdır.

Büyük Oksitlenme Olayı'nın somut delili, beklenmedik bir kaynaktan (yaygın olarak görülen sülfür elementinin izotoplarındaki yakın zamana ait dikkat çekici verilerden) geldi. 1990'larda, izotop dünyasının yükünü üstlenen analitik araçlar olan kütle spektrometrelerinin ayrıştırıcı güç ve duyarlılığında heyecanlandırıcı artışlar görüldü. Yeni nesil kütle spektrometreleri bilim insanlarının gittikçe daha küçük örnekleri, hatta mikroskobik mineral parçalarını ya da yaşayan tekil hücreleri, gittikçe daha yüksek bir netlikle analiz etmesine olanak sağlıyordu. Yaşamın temel unsurlarından biri olan sülfür, doğada dört sabit sülfür izotopu (sülfür-32, -33, -34 ve -36) olduğundan çalışmalar için özellikle cazip bir hedef oluşturunuyordu. Tüm bu izotopların çekirdeklerinde sülfürün gerekli olan on altı protonu bulunur fakat nötronların sayısı on altıdan yirmiye kadar çeşitlilik gösterir.

Sülfür izotoplarının dağılımı, sıklıkla basit kütle temelinde öngörülebilir. Tüm atomlar kırırdandır, fakat daha küçük izotoplar daha fazla kırırdandır. Sonuç olarak, her kimyasal reaksiyonda, hafif izotoplar, ağır olanlara göre fırlamaya daha meyillidir. İzotop bölünmesi denilen seçim süreci, bir sülfür atomları topluluğunun,

ister sert kayada ister canlı hücrede olsun, kimyasal bir reaksiyonu her deneyimleyişinde gerçekleşir. Sülfür söz konusu olduğunda 32 kütleli bir izotop, tipik olarak 34 ya da 36 kütleli bir izotoptan daha fazla bölünecektir. Dahası, bölünme oranı sıklıkla izotopların kütle oranıyla doğrudan ilgilidir: Sülfür-36'nın sülfür-32'ye bölünmesi her zaman sülfür-34'ün sülfür-32'ye bölünmesinin iki katıdır. Bu temel fizik, kaynağını doğrudan Newton yasalarından alır: Güç kütleyle ivmenin çarpımıdır. Daha küçük kütle, daha büyük ivme anlamına gelir, dolayısıyla verili bir güç altında, sülfür-32 sülfür-34'ten ve o da sülfür-36'dan daha fazla kıpırdar.

On yıl kadar önce, California Üniversitesi'nin okyanus kıyısındaki manzaralı kampüsünde çalışan jeokimyacı James Farquhar, yaklaşık 2,4 milyar yıldan daha yaşlı olan kayalardaki sülfür izotoplarının dağılımında olağanüstü ve beklenmedik bir değişim olduğunu gördü. Daha yakın zamana ait kayalar ve mineraler neredeyse her zaman beklenebilecek kütleyle bağımlılık eğilimi gösterir; sülfür izotop oranları neredeyse bütünüyle kütlenin oranlarına bağlıdır. Fakat Farquhar ve meslektaşları, 2,4 milyar yıldan yaşlı pek çok kayada sülfür izotoplarında radikal ölçüde farklı bölünmeler (bazı örneklerde, yüzde onluk kısmın pek çok örneğinden -bu örnekte çok fazla olan- uç noktada sapmalar) gördü. Su götürmez Newton yasalarından kütleden *bağımsız* bu tür bir sapmaya ne yol açmış olabilirdi?

Deneyisel kanıtlarla desteklenen zeki teorisyenler, kuantum mekaniğinin ince ayrıntılarında bir çözüme işaret etmekte gecikmedi. Ultraviyole radyasyonun etkisi altında, izotop davranışı Newton idealinden sapabilir. Sülfür-33 gibi tuhaf bir kütle numarası olan izotopların, ultraviyole radyasyonundan seçilerek etkilenebildiği ortaya çıkar. Bir sülfür dioksit ya da hidrojen sülfür molekülü sülfür-33 içerecek olursa ve bu molekül (büyük ihtimalle atmosferin yükseklerinde) bir ultraviyole ışınıyla karşılaşacak olursa daha hızlı reaksiyon verebilir. Sülfür-33, izotop oranlarını çarpıtan “kütleden bağımsız bir bölünme” deneyimler.

Fakat yeryüzünde 2,4 milyar yıl kadar önce neden ani bir değişiklik olmuştur? Bunun cevabı ozonun, üç oksijen atomundan

oluşan ve son yirmi yıldır büyük oranda gündemde olan bir molekülün UV soğurma özelliklerinde gizlidir. Bugün atmosferin yükseklerindeki ozon, Güneş'in ölümcül bir potansiyel taşıyan ultraviyole ışınlarına karşı önemli bir bariyer işlevi görür. Son yirmi yıl içinde alınan önlemler, bu yüksek irtifalı ozon tabakasının, büyük ihtimalle kloroflorokarbonlar denilen insan üretimi kimyasalların yıkıcı reaksiyonlarıyla gözle görülür biçimde tüketildiğini açığa çıkarır. (Bir zamanlar klimalarda kullanılan freon, bilinen en iyi örnektir.) Bu türden bir "ozon deliği" Dünya'nın yüzeyine kansere yok açan daha fazla UV radyasyonunun ulaşmasına yol açar. İyi haber kloroflorokarbon üretiminde dünya çapında bir yasağın, ozon tabakasının hızla onarılmasıyla sonuçlanır görünmesidir.

Oksijen gazının yükselmesinden ve bunun sonucunda ozon tabakasının kozmik açıdan Güneş'i bloke etme becerisi kazanmasından önce, atmosferde yoğun miktarda bulunan sülfür bileşikleri bitimsiz bir ultraviyole radyasyon banyosuna maruz kalıyordu. Bu türden zorlu koşullar altında, sülfür-33 içeren bileşikler kütleden bağımsız bölünmeyi deneyimledi. Büyük Oksitlenme Olayı'ndan sonra, atmosferin üst katmanındaki oksijen bu sülfür bileşiklerinden bazılarıyla tepki verdi ve bu tuhaf izotop etkisini neredeyse silip yok etti.

Dünya çapında yeni laboratuvarlar, Farquhar'ın bulgularını doğrulayıp güçlendirdikçe Dünya'daki bilim insanlarının büyük bölümü, Büyük Oksitlenme Olayı gerçeğini kabul etti. Bilim insanları ultraviyole ışınlarının önünü kesmek için yeni bir yol keşfetmediği sürece, sülfür izotop verileri, Büyük Oksitlenme Olayı'nın yaklaşık 2,4 milyar yıl önceki başlangıç noktasına işaret eder.

Oksijen Üretmek

O hâlde bütün oksijen nereden gelmiştir? Bugünlerde, herhangi bir biyoloji giriş dersinin ilk konularından biri fotosentez; bitkilerin bir yan ürün olarak oksijeni üretirken, dokularını oluşturmak için de suyu, karbondioksiti ve Güneş ışığını birleştirme yönündeki gözle görülür becerisidir. Bugün bitkilerin yaşadığımız

dünyayı yaşanılabilir bir yer yapmakta bu temel rolü oynadığı gerçeğini kanıksamış durumdayız fakat fotosentezin keşfi bilimdeki en büyük gelişmelerden biriydi. Bilimin pek çok önemli keşfi gibi de kademeli olarak geldi.

Önce suyun rolü keşfedildi. Bitki büyümesinin ayrıntılı mekanizmaları, on yedinci yüzyılda yaşayan bilim insanları için bir sırdı fakat ortak bir varsayım, bir bitki dokusunun, bitki büyüdükçe tüketilmesi gereken mineral-yoğun topraktan gelmesi gerektiği yönündeydi. Flaman fizikçi Jan Baptista Van Helmont, (1579-1644) 1640'larda basit bir deney yaparak bu varsayımı test etti. Kendi ifadesiyle:

İçine bir fırında kurutulmuş olan, yağmur suyuyla nemlendirdiğim doksan kilo toprak koyduğum toprak bir kap aldım ve bu kaba bir söğüt ağacının 2,2 kilogram çeken gövdesini ya da kökünü yerleştirdim ve nihayetinde, beş yıl sona erdiğinde, oradan yükselen ağaç 77 kilogram ve yaklaşık seksen beş gram çekiyordu: Fakat toprak kabı (ihtiyaç olduğu her durumda) yağmur suyu ya da damıtılmış suyla nemlendirdim... Sonunda yine kaptaki suyu kuruttum, aynı şekilde doksan kilo olduğunu gördüm, yaklaşık elli yedi grama gereksinimi vardı. Dolayısıyla sudan sadece 74 kilo kadar odun, kabuk ve kök çıktı.

Su, hikâyenin (bugün bildiğimiz şekliyle) yalnızca bir bölümünü oluştursa da Van Helmont'ın keşfi büyük bir ilerlemeydi.

Yüz yıl kadar sonra İngiliz rahip ve natüralist Stephan Hales, ilk kez bitkilerin suyun yanı sıra havanın da bir bileşenine dayandığını öne sürdü; atmosferdeki karbondioksitin izini sürün. Bugün hem topraktaki suyun hem de havadaki karbondioksitin fotosentez organizmalarının temel içerikleri olduğunu anlıyoruz. (İronik biçimde, karbondioksit gazını keşfeden Van Helmont'un kendisiydi fakat bitkilerin büyümesindeki temel rolünü fark etmedi.)

Bu durumda dahi, Güneş ışığının rolü anlaşılmazdı ve ayrıntıların ortaya çıkması üç yüz yıl daha geçmesini gerektirdi. Nükleer

fizik alanındaki gelişmeler yolu açtı ve kiklotronlar denilen yeni bir parçacık hızlandırıcısı nesli yüksek oranda radyoaktif olan izotop karbon-II'in (biyolojik reaksiyonların duyarlı bir araştırmasının) ilk düzenli tedarikini sağladı. 1930'ların sonunda, Berkeley'deki California Üniversitesi'nden Samuel Ruben ve Martin Kamen, bitkileri bir karbon-II "etiket"iyle karbondioksit maruz bıraktı. Bu şekilde, karbon-II'nin yirmi bir dakikalık geçici yarı-ömrü bu deneyleri oldukça güçleştirse de radyoaktivite belirtisini, doku kültürlerine taşınan karbondioksitin izini sürmek için kullanabilirlerdi.

Ruben ve Kamen'in 1940 yılındaki, karbon-14'ün, 5.730 yıllık sakın bir yarı ömrü olan çok daha uygun bir izleyici izotopun bir üretim yoluna ilişkin keşfi, biyofiziksel araştırmada bir devrim yarattı ve bitkilerin sudan, karbondioksitten ve Güneş ışığından nasıl yararlandığının hızlı bir kavranışıyla sonuçlandı. Kısaca, RuBisCo denilen akıllı (ve oldukça eski) bir protein –üç milyar yıl ya da daha eski bir döneme uzandığı düşünülen türdeki öncü siyanobakteri tipinde bulunan bir kimyasal- karbondioksit ve suyu yoğunlaştırır ve bu ham maddelerin temel biyo-inşa yapılarında birleştirilmesini kolaylaştırır. Soluduğumuz oksijenle sonuçlanan fotosentez reaksiyonunda, su yosunları ya da bitkiler, yan ürün olarak altı oksijen molekülü olan tek bir şeker glukoz molekülü yapmak için altı karbondioksit ve altı su molekülü tüketir. Bu kimyasal dönüşüm, eski arkadaşımız redoks tepkimesinin (paslanan demir gibi) bir diğer örneğidir. Bu durumda, su ya da başka bir elektron verici oksitlenirken, karbondioksitin içindeki karbon atomları elektronlar elde eder ve bu şekilde indirgenir. Fotosentezde, Güneş ışınları elektronları kaydıracak enerji desteğini sağlar.

Sınırlı kimyasal reaksiyon kulağı her ne kadar dolaysız geliyor olsa da karbondioksit ve su (ya da elektronlara katkıda bulunabilen başka bazı kimyasallar) şekerleri ve diğer biyomolekülleri üretir- fotosentezin ayrıntıları oldukça karmaşıktır ve hâlâ üzerinde çalışılmaktadır. Öncelikle, mikroplar Güneş ışığını ve diğer enerji kaynaklarını kullanmanın birkaç farklı yolunu bulmuştur. Oksijen üreten bitkilerin büyük bölümü ve su yosunu, bugün ışığı kırmızı ve mor dalga boylarında soğurmak için parlak yeşil pigment

klorofili kullanmaktadır. Fakat Dünya tarihinde çeşitli hücreler, hiç oksijen üretmeyen başka fotosentez yolları uygulamıştır. Değişimli ışık soğurucu pigmentler, kırmızı ve kahverengi su yosunlarını, mor bakterileri ve çok çeşitli renklerdeki olağanüstü güzellikte diyatome ve likenleri süsleyecek ölçüde gelişmiştir. Hatta birkaç harekete geçirici mikrop, fotosentez reaksiyonlarını kızıl ötesi radyasyonla (gözlerimize hiç görünmeyen fakat çıplak tenimizin ısı enerjisi olarak duyumsadığı dalga boylarıyla) güçlendirir.

Fotosentezin karmaşık kökenleri, St. Louis'te bulunan Washington Üniversitesi'nde, hem kimya hem biyoloji bölümlerinde kürsüsü olan biyokimyacı Robert Blankenship'in araştırmasının konusunu oluşturur. Blankenship ve Arizona Eyalet Üniversitesi'ndeki etkin astrobiyoloji ekibinden eski meslektaşlarını da içeren çalışma arkadaşları, hem Dünya'da hem de diğer dünyalarda ilksel yaşamın belirtilerini arar. Stratejileri, yaşayan pek çok farklı mikrop türünün (mor, kahverengi, sarı ve yeşil türlerin) genomlarını benzerlik ve farklılıkları tespit etmek için inceleyerek, çeşitli fotosentez yollarını gözlemlemektir. Veriler girift fotosentez aracının çeşitli yönlerinden gelir, fotosentez pigmentlerinin farklı yapıları, protein "reaksiyon merkezlerinin" elektronları bir molekülden diğerine kaydıran mutlak dizilimleri, aktarılan bu elektronların, sonraki aşamada hücrenin yapı taşlarının inşası için pek çok kullanılma biçimi ve hatta "duyarga sistemleri"nin farklı yapıları. (Hücreler, gözle görülür biçimde, ışık toplayan küçük duyargalar olarak işlev gören molekül kümeleri geliştirmiştir.)

Blankenship yaşamın şaşırtıcı çeşitlilikte fotosentez stratejisi tasarladığı tespitinde bulunur. Yaşam, erişebilir her türlü enerji kaynağından yararlanır gibi görünür. Mikroplar tekrar tekrar büyüme ve üreme için ışık toplamanın yeni yollarını bulmuştur; Dünya'nın evrim tarihinin derinlerine uzanan en az beş ayrı yol. Bu tarihin pek çok ayrıntısı belirsizdir fakat bu enerji toplayan kimyasal reaksiyonların, muhtemelen 3,5 milyar yıl öncesine dayanan en eski ve ilkelinin, hiç oksijen üretmediği kesindir. Bu ilk hücrelerin ataları bugün de varlıklarını korumakta ve kökleri en derinlerde

olan biyokimyaların anaerobik olduğunu, ne oksijene gereksinim duyduğunu ne de oksijeni tolere ettiğini göstermektedir.

Blankenship ve çalışma arkadaşlarının araştırması yalnızca bu farklı kimyasal stratejilerin büyük çeşitliliğini açığa çıkarmaz, aynı zamanda mikropların rakiplerinin fotosentez yollarını endüstriyel ticaret sırları gibi seçerek ışık toplama genlerini karıştırma ve değiştirme eğilimine de işaret eder. Gerçekten de neredeyse tüm bitkilerin kullandığı modern fotosentez şeması, (bayağı bir şekilde Photosystem I ve Photosystem II diye adlandırılan) iki ilkel şemanın daha bileşimi gibi görünür. Dolayısıyla çağdaş organizmalar karmaşık biyosentez reaksiyonlarını yüklenabilir ve Güneş ışığını Dünya’da yaşamın daha erken evrelerinde olduğundan çok daha etkin biçimde kullanabilir.

Daha Fazla Oksijen

Fotosentez olmadığında dahi, Dünya yüzeyi hidrojen moleküllerinin uzayda ağır ağır kaybedilmesi yoluyla ağır (dolayısıyla önemsiz) bir oksitlenme deneyimleyecekti. Atmosferin yükseklerinde, H_2O molekülleri, ultraviyole ışımanın ve kozmik ışınların, suyu hidrojen ve oksijene bölebilecek yıkıcı güçlerine karşı hassastır. Suyun atomları diğer basit moleküller, büyük oranda H_2 ve O_2 , yanı sıra ozonun, O_3 ’ün izleri şeklinde yeniden düzenlenir. Ortaya çıkan hızla hareket eden hidrojen H_2 molekülleri, çok daha ağır, hantal O_2 ve O_3 oksijen moleküllerinden farklı olarak, yeryüzündeki yerçekiminin kesintisiz çekiminden kaçabilir ve uzay boşluğuna fırlayabilir. Dünya tarihi boyunca, küçük oranlarda hidrojen bu şekilde kaybedilmiş, geride fazla oksijenin kademeli bir birikimini bırakmıştır. Bugün, kabaca birkaç olimpik boyutta yüzme havuzundaki atomlara eşit miktarda hidrojen her yıl uzayda kaybolurken bile, süreç devam eder. Aynı süreçle, daha küçük olan Mars, hidrojenini tutan çok daha az yerçekimiyle, suyunun büyük bölümünü harcamıştır. Dolayısıyla 4,5 milyar yıldan uzun bir süre içinde, yüzeye yakın mineraller paslanarak gezegene mevcut kırmızı rengini verirken, Mars’taki yüzeye yakın hidrojenin büyük

bölümü uzaya savrulmuştur. Böyleyken dahi, Mars'ın ince atmosferindeki oksijenin toplamdaki oranı önemsizdir: Tümü yüzeyde yoğunlaşacak olsaydı sıvı oksijen katmanı üç santimetrenin binde birinden daha az kalınlıkta olurdu.

Hidrojen kaybı yoluyla değiştirilemez oksijen üretimi, Dünya'nın yüzeyini milyarlarca yıllık benzer bir süreçte pas kırmızısına dönüştürmüş olabilir fakat Dünya'nın ilksel çevresi üzerinde fazla bir etkisi olmuş olamaz. En aşırı tahminlere göre bile, Büyük Oksitlenme Olayı'nda önce, trilyonda birden daha az atmosfer molekülü O_2 idi. (Bugün bu oran beşte birdir.) Bu önemsiz oksijen oranı, yeryüzünün yüzeyinde, okyanuslarda ve topraklarda oksitlenmeyi bekleyen büyük miktarlarda demir atomları tarafından, yaratılabildiği kadar hızlı biçimde ele geçirilecekti. Dünya'da yaşam kalmasa ve nihayetinde kıtaların daha eski, sabit bölümlerinde kırmızımsı, bozulmuş bölgelerle övünse de bu türden suni bir ruj tabakası yalnızca kozmetik olurdu.

Yaşam da fotosentezden önceki küçük bir oksijen envanterine katkı sağlamış olabilir. Aslında, hücreler çevrelerinden oksijen üretmenin en az dört farklı biçimini öğrenmişlerdir. Oksijenli fotosentez bugün büyük olandır fakat diğer biyokimyasal yollar antik dönemlerde küçük roller oynamış olabilir.

Yaşam, yapabildiği her şekilde, çevresinden enerji toplar. Oksijeni salarken enerji kazanmanın en kolay yolu, oksijenin hâlihazırda yoğun olarak bulunduğu ve oldukça reaktif bir molekülle başlamaktır. Dolayısıyla birkaç molekül, O_2 artı enerji üretmek için peroksit moleküllerinden (atmosferin yükseklerindeki reaksiyonlarla üretilen H_2O_2) yararlanmayı öğrenmiştir. Kuşkusuz, atmosferdeki oksijenin yükselişinden önce bu gibi moleküler türler nadir olarak görülürdü ve bu türden mikrobik mekanizmalar yeryüzünün ilksel çevresinin değişiminde çok fazla rol oynamış olamaz.

Hollanda'da bulunan bir mikrobiyolog ekibi, yakın zamanda daha geçerli bir oksijen-üretim senaryosu raporladı: Nitrojen oksitleri ayrıştırarak enerji kazanan dikkate değer mikroplar keşfettiler. Dünya tarihinin ilk evrelerinde NOX denilen bu kimyasallar

küçük oranlarda, nitrojen gazının minerallerle reaksiyonu yoluyla (örneğin gök gürültülü sağanaklar sırasında) üretildi. Bugün, nitrojen-yoğun gübrelerin kapsamlı kullanımı sayesinde, pek çok göl, nehir ve ırmak ağzı büyük mikrobik gelişmeleri destekleyen NOX bileşimleriyle oldukça kirletilmiştir. Yeni keşfedilen mikropolar nitrojen oksitleri nitrojen artı oksijene ayrıştırabilir, sonrasında oksijeni doğal gazı ya da metanı “yakmak” için kullanabilir ve böylelikle sarsıcı bir enerjinin tadına varabilir. Böylesi zekice bir kimyasal strateji, özellikle Mars gibi oksijenin çok az bulunduğu bir dünyada işlevsel olabilir.

Fosil Kanıtı

Oksijen üreten tüm mekanizmalar arasında, fotosentez tartışmasız şampiyondur fakat fotosentez ve oksijenin üretimi ne kadar erken bir evrede başlamıştır? Canlı antik dünyaların parçalı, somut kalıntılarını mercek altına alan paleontologlar, geçmişteki yaşamla bugünkü yaşam arasındaki bağlantıları, tüm diğer bilim insanlarından daha canlı biçimde görür. Dolayısıyla belki de bundan iki milyar yıl kadar önce, oksijenli bir Dünya’nın kanıtlarını ilk bulanlar olmaları şaşırtıcı değildir. Fosil avcıları, ilksel fotosentez arayışlarında, doğal olarak Dünya’daki en eski kayalara odaklanırlar.

Antik fotosentez hücrelerinin fosil kanıtları en iyi ihtimalle lekelidir. Birkaç değerli mikrobik kalıntı, milyarlarca yıllık gömülme, ısınma, sıkışma ve kimyasal değişimin üstesinden gelir. Hayatta kalanlar, çoğunlukla herhangi bir biyolojik yorumun edilmemesi için renkli bir hayal gücünü gerektirecek biçimlerde zedelenmiş ve ezilmiştir. Fosil mikrop kolonileri, sıklıkla küçük siyah leke serpintileri görünümündedir, dolayısıyla iki milyardan yaşlı her mikrop raporunun, peşinen alay konusu olmasa da ihtiyatlı bir kuşkuculukla karşılanması şaşırtıcı değildir.

Geride bıraktığımız kırk yılın büyük bir bölümünde, paleontolojik güçlüğün en ateşli savunucularından biri, California Üniversitesi’nin Los Angeles kampüsünde profesör olarak görev yapan J. William (Bill) Schopf olmuştur. Schopf, giderek artan bir

oranda antik olan mikrobik fosiller üzerine yaptığı çalışmalar temelinde, yaşam iddiasını doğrulamak için gerekli ve yeterli özelliklerin bir listesini geliştirmiştir. Öncelikle daha yakın döneme ait, iyi korunmuş ve şüpheye yer bırakmayan türlere odaklanan Schopf, fosil kalıntılarını oldukça inandırıcı biçimde gittikçe daha uzak bir geçmişe, üç milyar yıldan uzun bir zaman öncesindeki Arkeyan Devir'e taşıyan bilim insanıdır.

Schopf'un kriterleri dolaysız ve makuldür: Fosil mikropları, mikropların bir zamanlar yaşamış olabileceği çevrelere yerleştirilen uygun biçimde tarihlendirilmiş tortul katmanlardan gelmelidir. Fosiller boyut ve biçimsel açıdan tutarlık göstermelidir; pek çok eski kayada bulunan türden biçimsiz siyah leke ve çizgilerden farklı olarak, tutarlı küreler, dallar ya da zincirler. Schopf ve öğrencileri aynı zamanda Dünya'nın en eski tortul kayalarının gözlemine içkin öznelliğin bir bölümünü ortadan kaldırmak için istatistiği hayata geçirdi.

Herhangi bir mikrobik fosil grubunun temel özelliklerinin bu niceliksel kataloğu Schopf'un çok işine yaradı. Araştırmacılarla rekabet hâlinde, antik yaşamın daha sorgulanabilir bazı iddialarına ilişkin şüpheler uyandırırken, yeni fosil bulgularının su götürmez betimlemelerini yayınlayabildi. 1996 yılında, NASA bilim insanları bir Mars meteoridinde mikrobik kalıntıların bulunduğunu duyurduğunda, en büyük güçlkle karşılaştı. O yılın Ağustos ayında, NASA'nın ev sahipliği yaptığı dramatik bir basın toplantısında, Schopf tek muhalif sesti. Biraz üstü kapalı bir küçümsemeyle, Mars "fosillerinin" aşırı küçük olduğuna, destekleyici kimyasal ve mineralojik kanıtlardan yoksun olduğuna ve yanlış bir kaya türünde olduğuna işaret etti. (Schopf'un ikna edici argümanlarına karşın, Başkan Clinton keşfi övdü ve bu da NASA'nın astrobiyoloji fonlamasında önemli bir sarsılmaya yol açmış olabilir; bu Schopf dâhil pek çoğumuzu kökenler oyununda destekleyen paraydı.)

Schopf, ironik biçimde, 1993 yılında, Apex çörtünden Dünya'nın en eski mikrobik fosillerinin, Kuzeybatı Avustralya'da bulunan yaklaşık 3,5 milyar yıllık bir kaya oluşumunun keşfini duyurduğunda ortaya koyduğu iddia için aynı türden utandırıcı bir

eleştiri alacaktı. Hücre benzeri bir bölümlendirmesi olan fikir verici uzun siyah yapıların fotoğrafları, yeterince ikna edici görünüyordu. *Science* dergisinde yayınlanan çok gündeme gelmiş bir öykü, sanatsal el çizimleriyle (okumayı kolaylaştıracak) fosil fotoğraflarını destekliyordu; bunlar siyanobakterilerin, benzer görünümlü modern fotosentetik mikropların fotoğraflarının yanına yerleştirildi. Hatta Schopf, fosillerinin muhtemel oksijen üreticileri olduğunu iddia etti. Birkaç yıl içinde, en ikna edici fotoğrafları tüm zamanların en fazla çoğaltılan paleontolojik imgelerinden birine dönüşmüştü ve sayısız ders kitabını, sıklıkla mikropların ıslık fotosentetik olduğu önermesiyle birlikte, “ilk fosil” iddialarını tekrar eden başlıklarla süslüyordu.

Bilimde, sıra dışı iddiaların sıra dışı kanıtlar gerektirmesi bir kuraldır. Yanı sıra, sıra dışı iddiaların sıklıkla sıra dışı bir inceleme tabii olduğu da doğrudur. Schopf’un tüm fosil türleri Londra’daki İngiliz Müzesi’nde, cam parçaları üzerinde birleştirilen kayaların dikkatlice kataloglanmış, ince şeffaf bölümleri olarak korunur. 2000 yılında, Oxford’lu paleontolog Martin Brasier, Apex çört malzemesinin ayrıntılı bir yeniden incelemesine başladı ve oldukça farklı bir sonuca ulaştı.

Schopf’un “ince” Apex çörtü bölümlerinin, en azından bir mikrobun boyutuyla karşılaştırıldığında oldukça kalın olduğu ortaya çıktı. Brasier ve meslektaşları sonunda Schopf’un fotoğrafını çekmiş ve yayınlamış olduğu küçük objelerin büyük bölümünün yerini tespit edebildi fakat pek çok fotoğrafın en iyi ihtimalle yanıltıcı olduğunun farkına varmak onları şaşırttı. Schopf’un bugün klasik olan fotoğraflarının her biri tek bir mikroskobik odak düzlemini (üç boyutlu lekeli siyah objelerinin iki boyutlu ince dilimlenmesini) temsil eder. Brasier ve ekibi, imgelerin üç boyutlu bir montajını oluşturan, dolayısıyla çok daha karmaşık bir öyküyü açığa çıkaran daha yeni bir fotoğraf tekniği uyguladı. Ancak mikroskobu Schopf’un fotoğraflarının mutlak derinliğine odakladıklarında, bugün klasik olan Apex “fosillerinin” imgelerini yeniden üretebilirlerdi. Fakat odağı biraz yükselttiğinizde ya da alçalttığınızda, başlangıçta mikrobik hücrelerin inandırıcı, uzun ipi gibi

görünen şey, bazen kıvrımları, dallanmaları ya da kısa ve eğri çizgileri olan dalgalı bir kâğıda ya da dağınık bir lekeye dönüşüyordu. Brasier'in gözlemlerine göre "mikrop zincirleri" biyolojik herhangi bir şeye çok az benzerlik gösteren karmaşık üç boyutlu yapılar yoluyla yanıltıcı biçimde seçilen çapraz kesitlerdir. Brasier ve meslektaşlarının can sıkıcı meydan okuması "Questioning the Evidence for Earth's Oldest Fossils," ünlü *Nature* dergisinin 7 Mart 2002 sayısında yer aldı.

Schopf, aynı sayıda, Brasier'in yazısından hemen sonra yayınlanan kendi makalesi "Laser-Raman Imagery of Earth's Earliest Fossils" ile karşı koydu. Schopf ve meslektaşları Apex çörtünün karbon-yoğun siyah lekelerinin yeni analizlerini sundular ve biyolojiyle tutarlı izotop kompozisyonlarına ve atomik yapılara sahip olduklarını gösterdiler. Schopf, mikropların fotosentetik olduğu yorumundan vazgeçer görünse de cesurca "en eski fosil" retoriğini tekrarladı. Ancak, Schopf'un iddiaları üzerine kuşku tohumları ekilmişti ve yaşamın ilk işaretlerinin avında çıta yükseltilmişti.

(Son olarak, Martin Brasier ve Avustralyalı meslektaşları bugün "en eski fosilleri" -Schopf'un biraz daha yaşlı fakat yine de tartışmalı lekelerinden yalnızca otuz iki kilometre uzakta keşfedilen 3,4 milyar yaşındaki Strelley Pool oluşumunun kalıntılarını bulduklarını iddia etmektedir. Pek az gözlemci bu gelişmenin tartışmadaki son söz olmasını bekler.)

En Küçük Fosiller

Bir mikrop kolonisi öldüğünde ne olduğunu hayal edin. Neredeyse her zaman, bir zamanlar yaşayan bir hücre olan küçük kimyasallar paketi parçalanır ve dağılır; büyük moleküller daha küçük moleküller parçalara, büyük oranda su ve CO₂'ye bölünür. Hazmedilemeyen moleküller okyanuslarda çözünür, havada buharlaşır ya da kayalarda hapsolürken diğer mikroplar en lezzetli parçaları yiyebilir. Sıklıkla birkaç yıl sonra, geriye hiçbir şey kalmaz çünkü zaman, bu türden hassas moleküller kalıntılara karşı kibar değildir.

Sıra dışı koşullar altında -ölü hücreler hızla gömülürse, çevrede hiç aşındırıcı oksijen yoksa, ev sahibi kaya hiçbir zaman çok fazla ısınmıyorsa- en dayanıklı biyomoleküllerden birkaçı, oldukça değişmiş bir formda olsa da varlıklarını sürdürebilir. Varlıklarını sürdürme ihtimalleri en yüksek olanlar, yaklaşık yirmi karbon atoma kadar sağlam bir omurgası olan, bazen basit uzun bir zincir hâlinde (belki farklı noktalara kayan birkaç karbon atomuyla birlikte) bazen de (olimpiyat logosundan farklı olmayan biçimde) iç içe geçen halkalardan oluşan bir grup olarak düzenlenmiş moleküllerdir. Bu tanılayıcı biobitler aşırı küçük iskeletlere benzer. Değeri düşürülen ve en dayanıklı çekirdek haricinde her şeyden soyutlanan çok daha geniş bir işlevsel moleküller bütününden kalanları temsil ederler.

Antik bir tortul kayada bu türden bir moleküler iskelet bulabilecek olursanız ve bunun yakınlardaki katmanlardan bulaşanlar ya da daha yakın zamanda ölmüş hücrelerin yaygın kalıntılarından biri (örneğin modern yüzey altı mikroplardan, hatta başparmağınızdaki ölü deriden) olmadığından emin olabilirsiniz, kimyasal bir fosili (bir zamanlar yaşayan bir mikrobun gerçek atomlarını) keşfettiğinizi iddia edebilirsiniz. Schopf'un Apex çörtündeki siyah lekelerine duyulan ilgi bundan kaynaklanır.

Pek çok modern paleontolog büyüleyici bir ikili yaşam sürer. Bir yandan, zorlu bölgelerde kilometrelerce tırmanarak, aşırı sıcak çöllerde, donmuş tundralarda ve yüksek dağlarda bulunan uç noktadaki çıkıntılardan yüzlerce kilo değerli kaya çıkararak saha jeoloğunun çıkardığı güçlüklerle katlanmayı seçebilirler. Her yıl küçük ekipler yeni tür arayışları içinde Batı Avustralya, Güney Afrika, Grönland ve Kanada'nın merkezine ulaşmak için yola çıkar. Diğerleri, antik kayaların hava ve bitki örtüsüyle bozulmamış kaya özlerini güvenceye alma umuduyla sondaj kulelerinde çalışır. Bu türden keşif gezileri aylarca süren güçlük, tehlike ve yoksunluk anlamına gelebilir.

Bu maceralar en küçük bir soluğun ya da parmak izinin üç milyar yaşındaki değerli kaya örneğini geri dönüşü olmayacak biçimde kirletebileceği aşırı temiz laboratuvarlarda aylar boyunca

yürütülen yorucu analizle çelişir. Bir kayadan molekülleri tekil olarak çıkarmak için zaman ve sabır, büyük bir özen ve karmaşık analitik araçlarla dolu bir depo gerekir. Bu yirmi birinci yüzyıl sanatının başat uygulayıcılarından biri, Massachusetts Teknoloji Enstitüsü'nün Yeryüzü ve Gezegen Bilimleri Bölümü'nde çalışan Avustralyalı paleontolog Roger Summons'tır. Burada, Dünya'nın en eski kayaları üzerinde çalışan bir düzine moleküler fosil avcısından oluşan başarılı bir ekip olan Summons Laboratuvarı'nın başındadır.

Summons, on iki yıl kadar önce, Avustralya Ulusal Üniversitesi'nde görev yapığı sırada, Batı Avustralya'da bulunan 2,7 milyar yaşındaki Pilbara kabuğunun değerli tortuları üzerinde çalışırken manşet olan bir grup bilim insanını yönetiyordu. Summons ve meslektaşlarının, eşsiz bir kaya özü, siyah karbon-yoğun kil taşının (moleküler fosiller içermeye ihtimali oldukça yüksek olan türden bir tortul kayanın) cezbedici bir bölümünü içeren yaklaşık bir kilometre uzunluğunda bir malzeme dizisine erişimi vardı. Bu Pilbara kayalarının özel bir önemi vardı çünkü temelde, sıcağın değiştirmedığı ve yüzey yaşamı veya yer altı sularının kirletmediğı bir görünüme sahiptiler. Eski biyomoleküllerin varlıklarını sürdürebileceğı bir kaya varsa, bu oydu.

Avustralyalı araştırmacılar hopanoidlere, altıncı bölümde sözü edilen kusursuz zorlu biyomoleküller sınıfına odaklandı. Hopanoidler koruyucu hücre zarlarının sabitlenmesinde önemli roller oynar ve yaşayan hücrelerin dışında nadir olarak görülmelerinden ötürü, muhtemelen tüm moleküler biyo-işaretlerin en ikna edicileridir. Her hopanoidin iç içe geçmiş beş halkadan oluşan özel bir omurgası vardır; (her biri altı karbon atomuyla tanımlanan) dört küçük altıgen ve uç noktada (beş karbon atomu bulunan) beşinci bir beşgen. Her halka komşularıyla iki karbon atomunu paylaşır ve toplamda yirmi bir omurga karbon atomları vardır.

Summons'ın Avustralya laboratuvarında yürütülen incelikli çalışmalar, her ikisi de 1999 yılının Ağustos ayında yayınlanan iki üst düzey yazıyla sonuçlanmıştır. Summons'ın doktora öğrencisi Jochen Brocks'un başyazarı olduğu *Science* dergisinde yayınlanan

ilk yazıda, 2,7 milyar yaşındaki Pilbara kayalarında (daha önceki rekoru bir milyar yılla kıran bilinen en eski moleküler fosillerde) bulunan, *sterane*⁸ denilen özel moleküllerin keşfi betimleniyordu. *Sterane*'lerin keşfi, antik ekosistemlere ilişkin pek çok şeyi açığa çıkarabilir çünkü farklı türler halkaların çevresinde çeşitli yerlere yapışan ekstra karbon atomlarının olduğu farklı türde birkaç *sterane* kullanır. Brocks ve meslektaşları, Pilbara *sterane*'lerinin ökaryot denilen oldukça gelişmiş hücreleri (DNA'nın bulunduğu bir çekirdeği içeren hücreleri) tanıladığını öne sürmüştür. Yayınlandığı dönemde, bilinen en eski ökaryot hücreleri yalnızca yaklaşık bir milyar yaşındaydı, öte yandan yaklaşık iki milyar yıl önce var olduğu düşünülen türdeki ilkel mikropların bir çekirdeği yoktur, dolayısıyla bu yorum doğrudan inançsızlıkla olmasa da şaşkınlıkla karşılanmıştır. Şayet keşif doğruysa yalnızca iki sonuca varmak mümkündür. Ya ökaryot herkesin düşünmüş olduğundan çok daha erken görülmüş (ve yaşamın evrimi de buna bağlı olarak hızlanmış) ya da *sterane*'ler ökaryotlardan çok daha erken gelişmiştir. Her iki durumda da yaşamın tarihine ilişkin kavrayışımızın gözden geçirilmesi gerekir.

Summons'ın başyazarı olduğu, *Nature* dergisinde yayınlanan ikinci makalede aynı ölçüde şaşırtıcı bir iddia ise Batı Avustralya'da, 2,5 milyar yaşındaki eski siyah kil taşlarının yakınındaki yaklaşık 1000 kilometre gibi ortalama bir yükseklikte olan McRae Dağı'nın, ilk halkasının kenarından çıkan ilave bir karbon atomuyla hopanoid beş halka molekülünün bir değişkenini içeriyor olmasıydı. Bu iki metil-hopanoid molekülü, yalnızca Dünya'nın başat oksijen üreticileri olan fotosentetik siyanobakterilerden ötürü bilinir. Summons, fotosentezin, 2,5 milyar yıl öncesinde yürürlükte olduğu sonucuna varmıştır. Bu türden bir kronoloji yaklaşık olarak bu dönemde bilinen oksijen artışıyla tutarlıydı fakat fotosentezin kökeninin korunan moleküler parçalarda aranabileceği önermesi paleontolojiye heyecan verici yeni kapılar açtı.

8 Steroid veya sterollerin bozunmasıyla ortaya çıkan dört halkalı bileşik.

Herkes ikna olmamıştı. Bill Schopf'un geçmişteki "Dünya'nın en eski fosilleri" iddiaları gibi, Roger Summons'ın sıra dışı hopane⁹ bulguları da bir muhalefetle karşılandı; bu Jochen Brocks'un kendi çalışmasını, yanı sıra iki milyar yıldan daha yaşlı olduğu düşünülen biyo-işaretler üzerinde yapılan çalışmaları da içeriyordu. Kuşkuçulara göre, genç hopanoidler her yerdedir. Derin yüzey altı, kayalarda yaşayan mikroplarla doludur, dolayısıyla iki milyar yıldan uzun süren Dünya tarihi süresince kirlenme kaçınılmazdır. Hopanoidler ve diğer moleküller kuşkusuz oradadır fakat oraya ne zaman ve nasıl geldiklerini kim söyleyebilir ki? İzlemeye devam edin: Bu tür tartışmaları izlemek keyiflidir ve neredeyse her zaman yeni keşiflerle sonuçlanır.

Zamanın Kum Düzlükleri

Bir paleontolog başka nereye bakmalıdır? Fosil kalıntıları içinde fotosentezin tarihiyle ilişkili pek çok ipucu arasından, mikrobik matlar hem en gözle görülür olanlar hem de en çok görmezden gelenler olabilir. Bugün, su yosunlarının kalın, karmaşık katmanlar hâlinde ipliklerle iç içe geçebildiği sığ kıyılarda ve ağır akan nehir ve akarsu kıyılarında oluşurlar. Bu katı, kumaş benzeri matlar, su yosunlarının sel ve dalgaların kaçınılmaz aşındırma eyleminden korunurken suyun, Güneş ışığının olduğu bir çevreye erişiminin olmasını garantiler. Geniş yayılımlarına karşın, paleontoloji topluluğu Nora Noffke'nin keşiflerinden önceki fosil mikrobik matları neredeyse görmezden gelmiştir.

On yıldan uzun bir süre boyunca, Norfolk, Virginia'daki Old Dominion Üniversitesi'nde profesör ve antik mikrobik matlar konusunda dünyanın başat otoritesi olan Nora Noffke'nin asistanlığını yapma şansım oldu. Keskin gözleri, özgün bir bakış açısı ve çelik gibi bir azmi olan Noffke, alan çalışmasını yürütmek için dünyanın en tehlikeli alanlarından birini seçti. Güney Afrika, Batı Avustralya, Namibya ve soğuk Grönland'daki ücra ve berbat yerlere gitme cesaretini göstererek, daha önce hiç kimsenin ilgilenmeyi

9 Triterpen olarak sınıflandırılan organik bileşik.

düşünmediği paleontolojik harikaları gün yüzüne çıkardı. Nora, tekrar tekrar mikrobik matların Dünya'nın en antik kumlu kıyılarının büyük bölümü üzerinde geliştiğinin kanıtlarını buldu.

Mikrobik mat fosillerinin bu kadar önemli olmasının nedeni, bir tür fotosentezin sonucunda oluşmuş olmalarının gerekmesidir. Parçalı kalıntıları siyah çört ve kil taşlarında bırakan mikropolar, Güneş ışığından uzak derin bölgelerden gelmiş olabilirdi. Bu mineralleşmiş tepeler, zorlu, dalgalarla çevrili bir çevrede basitçe koruyucu yükselti sayılabilecek olsa da 3,5 milyar yıl önce sine ait bu sığ su stromatolitlerinin fotosentetik bir yaşam tarzını desteklediği yönünde güçlü bir iddia ortaya atılabilir. Fakat mikrobik matlar fotosentez yapabiliyor olmalı. Güneş ışığı sebebiyle değilse, bir mikrop kolonisi neden kendisini zorlu, sığ bir gelgit kuşağında onarma sıkıntısına katlansın?

Nora Noffke'nin katkılarını bir bağlama yerleştirebilmek için, gerçekten yaşlı olan diğer fosilleri dikkate alın. Geride bıraktığımız yarım yüzyılın büyük bir bölümünde, Dünya'nın en eski yaşamını arayan paleontologlar üç tür kaya oluşumuna odaklandı. Bunlardan ilki, Bill Schopf'un 3,5 milyar yaşındaki tartışmalı Apex çörtü gibi siyah çörtlerdir. Siyah çörtler ilk kez 1960'larda, Harvard'lı paleobotanist Elso Barghoorn, Minnesota'nın kuzeyinde ve Ontario'nun batısında bulunan 1,9 milyar yaşındaki Gunflint çörtünde antik mikrobik fosiller olduğunu fark ettiğinde paleontolojik başlıklar oluşturdu. Barghoorn ince kumlu, silika-yoğun kayanın ince, şeffaf bölgelerini inceledi ve antik mikrobik beden fosillerini en ince ayrıntılarıyla gördüğünü fark etti. Barghoorn, on yıl kadar önce, Gunflint'te, küre benzeri anlaşılmaz objeleri ilk kez gözlemlemiş olan jeolog Stanley Tyler'la birlikte, hayret verici tartışmasız hücre gruplarını; bazıları bölünme sürecinde olan mikroskobik küreler, çubuklar ve iplikler ekosistemini betimledi. Gerçekten de daha eski fosillere ilişkin onlarca yıl süren birbirini izleyen iddialara karşın, bazı paleontologlar hâlâ Gunflint çörtünün, fotosentetik hücrelerin yeryüzündeki mutlak biçimde tartışmasız olan en eski fosilleri içerdiğini vurguluyor.

Roger Summons ve meslektaşlarının incelediği türden ikinci bir kaya tipi olan karbon-yoğun siyah kil taşları, belki de antik moleküler fosillerin en iyi kaynağıdır. Siyah kil taşları çamur ve organik artıkların su derinliklerindeki birikintileridir, dolayısıyla antik mikropların kalıntılarını barındırdıklarından emin olabiliriz. Sonuç olarak, Avustralya'da, Güney Afrika'da ve bir milyar yaşındaki diğer yerlerde bulunan kalın siyah kil taşı dizilerinin her mikroskobik katmanı incelikli bir kimyasal incelemeden geçmektedir. Bazıları molekülleri tekil olarak tespit edebilme becerisine sahip daha yeni, daha duyarlı analitik araçlar geliştikçe elbette önemli keşifler de yapılacaktır.

Üzerinde yoğun olarak çalışılan üçüncü türdeki antik fosil içeren oluşum, stromatolitler, ilksel yaşamda çöküntüleri oluşan katmanlı kubbe benzeri mineral yapılarıdır. En ünlüleri Batı Avustralya'nın Köpekbalıği Koyu Dünya Mirası Sit Alanı'nda bulunan, sığ denizlerdeki modern yaşam stromatolit resifleri olmasaydı, paleontologlar sıklıkla kireç taşları içinde korunan bu tepelerin kökenleri karşısında şaşkınlık içinde kalabilirdi. Bu tuhaf tortul özellikler, mikroplardan (günümüzün yaşayan resifleri söz konusu olduğunda fotosentetik mikroplardan) oluşan balçıklı bir yüzey, katmanlarca mineral ürettiğinde ortaya çıkar. Dünya çapında, bazıları üç milyar yıldan daha yaşlı kayaların içinde bulunan yüzlerce fosil stromatolit yeri tespit edilmiştir.

Siyah çört, siyah kil taşı ve stromatolitler. Nora Noffke, Dünya'nın bu en eski fosilli oluşumlarına dördüncü bir kaya tipi ekledi: Kum taşı. Kum taşlarının neden göz ardı edildiği anlaşılabilir. Fosillerin büyük bir bölümü çört ya da kil taşı gibi ince kumlu kayalarda ya da kireç taşı resiflerinde muhafaza edilir. Buna karşılık kum, çoğu mikroptan daha büyük mineral parçalarına oranla iri tanelidir. Dahası, kum yaşam işaretlerinin büyük bölümünün hızla silindiği; aşındırıldığı, yıkandığı ve saçıldığı sahilde, çalkantılı gelgit bölgesinde toplanma eğilimindedir. Fakat Noffke modern gelgit düzlükleri ve onların zengin ekosistemleri üzerinde yirmi yıl boyunca çalıştı ve sert, ipliksi mikrobik matların sığ, kumlu kıyılarda farklı yapılar oluşturduğunu gözlemledi; bu matlar kırıksık

bir masa örtüsünden farklı olmayan biçimde, kum yüzeyinde kıvrımlı bir yapı oluştururlar; tortu parçalarını deniz yosunlarından oluşan kalın, esnek bir zincirde bağlar ve hapsederler; kumdaki dalgacık işaretlerinin şablonunu değiştirirler ve fırtınalarda farklı geometrik yığınlar bölünerek ve küçük İran halıları gibi toplanarak parçalara ayrılırlar.

Çoğu kum taşı çıkıntısı, gözle görülür biçimde biyolojik herhangi bir şeyden yalıtılmış olarak yumuşak ya da hafif engebeli görünür. Fakat Noffke antik kayalardaki fosilleşmiş mikrobik matların karakteristik bir özelliği olan ilginç kırışık ve çatlak yüzeyleri fark etmeyi öğrendiğinde, neredeyse baktığı her yerde hemen göze çarpmayan özellikler gördü. 1998 yılında, Fransız Alplerindeki Montagne Noire'nin 480 milyon yaşındaki kayalarının yüzeylerinde tanılayıcı kıvrımlı dokular olduğunu tespit etti. 2000 yılında, doktora sonrası araştırmaları için Harvard Üniversitesi'ne geçtikten sonra, kaydı daha da gerilere kaydırды ve Namibya'nın 550 milyon yaşındaki kayalarında benzer şablonlar tespit etti. Mikrobik matların yarım milyar yıl önce var olmuş olması özel bir haber değeri taşııyordu; tüm paleontologlar, mikrobik matların, bundan çok uzun süre önce, kıyı bölgelerini donatmak üzere çevrede bulunmuş olması gerektiği konusunda hemfikir olurdu. Fakat Noffke'den önce hiç kimse, modern mat sistemlerini incelemeye zaman ayırıp daha sonra antik kayalarda tartışmasız fosiller olarak korunan benzer izler olduğunu fark etmemişti.

2001 yılında, Noffke, Güney Afrika ve Avustralya'da bulunan üç milyar yaşın (ki bu varsayılan Büyük Oksitlenme Olayı'ndan çok uzun zaman önceki bir tarihtir) üzerindeki oluşumlardaki bir dizi çığır açan mikrobik mat keşfinin ilkinin yaptı. Gün ortası güneşinin tepedeki ışıltısı altında bu tür özellikleri tespit etmek güçtür fakat akşamın ilerleyen saatlerinde, uzun ve sıklıkla verimsiz arayışla geçen günlerin sonunda, Güneş ışığı çıplak kayanın üzerine düşerken, gösterge niteliğindeki kıvrımlı kum taşı yüzeyleri tam anlamıyla rahatlatma içindedir. "Yapılar her yerden fırlar gibiydi," diye hatırlar zorlu bir Afrika bölgesi yolculuğunun son gününün son saatinde yapılan heyecan verici bir keşfe ilişkin olarak.

Nora bana ilk kez 2000 yılında, Harvard Üniversitesi'nden rehberi, paleontolog Andy Knoll'un önerisiyle geldi. Andy ile 1970'lerdeki lisansüstü öğrenciliği günlerimizden beri arkadaştık; kariyerlerimiz bir dönem için bizi farklı bilimsel yönere taşımış fakat astrobiyolojiye duyduğumuz ortak merak, sohbetimizi tazelemişti. Knoll, Noffke'nin antik matlara ilişkin savının neredeyse bütünüyle, bazen anlamlı olsa da zaman zaman kuşkucu bir hayal gücü gerektiren yüzey özellikleri üzerine kurulu olduğunu fark etti. Noffke'nin modern matlarla kapsamlı deneyiminden yoksun olan ortalama bir paleontolog, tuhaf dalgacık izlerini ya da kıvrımlı kaya yüzeylerini kolaylıkla görmezden gelebilir ya da önemsemeyebilirdi. Dolayısıyla Knoll onu farklı biçimde tırtıklı katmanlarında korunan minerallere, biyomoleküllere ve izotoplara analitik veriler ekleyerek matlara ilişkin savını desteklemesi için cesaretlendirdi. Belki antik karbon izleri ya da karakteristik mineral yığınları, en eski, ancak anlaşılmaz bazı mat benzeri özellikler için somut bir delil sunabilirdi. Diğer Knoll öğrencileriyle çalışmıştım, dolayısıyla çağrıyı aldım.

Noffke'nin gönderdiği ilk örnekler, bu türden analizlerin neden önemli olduğuna ilişkin uygulamalı bir ders oldu. Üç milyar yaşındaki kumlu bir tortuda, dalgalanan ince siyah katmanlar bulmuştu; bu aynı zamanda o dönemdeki en eski mikrobik mat kaydıydı. Siyah hatların, ortalama kabuğa kıyasla daha ağır karbon-13 izotopundan yaklaşık yüzde üç az bir oranla, yaşamın gerekli izotopik imzasıyla karbon-yoğun olduğunun onayına ihtiyacı vardı. Hâlihazırda *Science* için bir makale yazmıştı, bunu teslim etmeye hazırdı ve o tek onaylayıcı değeri bekliyordu. Kaya örnekleri Cambridge, Massachusetts'ten FedEx'le ve yüksek öncelikle, Jeofizik Laboratuvarı'na hızla getirilmişti. Baskı altındaydım.

Şans eseri, Carnegie Enstitüsü'nün Jeofizik Laboratuvarı'nda karbon izotop uzmanı olan meslektaşım Marilyn Fogel yardım etmeye istekliydi. Marilyn örneğe baktı ve bana ne yapmam gerektiğini söyledi: Kayayı ez ve ince bir toz hâline getir, birkaç küçük saf folyo bardağın içine birkaç mikrogram toz koy, örnekleri tart ve her folyoyu büzüştürerek havalı tüfek mermisi boyutunda

küçük bir top hâline getir. Daha sonra bu örnekler ve karbon izotop standartları, birer birer, karbon içeren her bileşimi karbondioksit gazı olarak buharlaştıran bir ocağa konuldu. Gaz, karbon-12 ve karbon-13'ü ayıran ve ölçen duyarlı bir kütle spektrometresine süzüldü. Belirleyici oranı elde etmek yalnızca birkaç saat aldı.

Nora, diğer mikrobik matlara özgü -25 -35 aralığında bir şey umuyordu. Fakat makine farklı bir şey söylüyordu. İzotopik oran o'a yakındı, bu biyolojiyle hiçbir ilgisi olmayan bir orandı. Bu daha çok sıvılardaki mantodan yükselen ve ince siyah grafit damarcıkları olarak biriktirilen türden inorganik karbona özgüydü. Sözün özü: Noffke'nin örneklerindeki siyah yapılar karbon-yoğundu fakat tartışmasız biçimde biyolojik değillerdi.

Aklımızda bu dersle, hızla, Nora'nın çeşitli alanlardan (Güney Afrika, Avustralya ve Grönland'dan) toplamış olduğu çok sayıdaki başka değerli antik tortuda bulunan ince, karartılmış özelliklerin analizine giriştik. -30 aralığındaki, mikrobik matlara uygun karbon izotoplarını defalarca ölçtük ve mikropların üç milyar yıldan uzun süre önce, antik Dünya'nın kumlu kıyılarında geliştiğine dair başka ikna edici kanıtlar bulduk. Biyomoleküllerin küçük siyah lekelerinden ya da izlerinden farklı olarak, Noffka'nın kanıtını alanda, bir çıkıntı boyutunda görebilirdiniz. Kanıtını ellerinizde tutabilirdiniz.

Fakat temel bir soru hâlâ varlığını korumaktadır: Mat mikropları oksijen üretmiş midir yoksa Güneş ışığını daha basit fotokimya için mi kullanmışlardır? Mikroplar, Güneş'ten fayda sağlamaya yönelik, tümü oksijen üretmeyen çeşitli stratejiler geliştirmiştir. Dolayısıyla bu üç milyar yaşındaki mat oluşturan organizmaların hayatlarını nasıl kazandığının ayrıntısı, bir süre daha sıcak bir gündem oluşturmayı sürdürecektir.

Mineralojik Patlama

Dünya'nın oksitlenme öyküsündeki ani farklılaşma evresi geniş çapta kabul görür. 2,5 milyar yıl öncesinden önce, Dünya temelde oksijenden yoksundu. Fotosentetik mikropların yükselişi yaklaşık

2,4 ila 2,2 milyar yıl arası öncesinde, atmosfer içindeki oksijen bugünkü yoğunluğunun yüzde birinin üzerine çıktığında dramatik toplu değişikliklere neden oldu. Bu geri dönüşü olmayan değişim Dünya'nın yüzeye yakın çevresini dönüştürdü ve daha da dramatik değişikliklerin önünü açtı.

Geçmişteki anlatımların gösterdiği gibi, bu geçişin ayrıntıları pek çok bilim insanının kariyerinde odak noktasını oluşturmuştur. Son yıllarda, uzun süredir meslektaşım olan Dimitri Sverjensky ile birlikte çarpıcı ve bir anlamda mantık dışı bir iddiayla tartışmaya katıldık: Dünya'daki mineral türlerinin pek çoğu yaşamın sonucudur. Yüzyıllardır, üstü kapalı varsayım mineral krallığının yaşamdan bağımsız olarak işlediği yönünde olmuştur. Buna karşılık bizim yeni "mineral evrimi" yaklaşımımız jeosfer ve biyosferin birlikte evrimini vurgular. Bilinen yaklaşık dört bin beş yüz mineral türünün tam olarak üçte ikisinin, Büyük Oksitlenme Olayı'ndan önce oluşamayacağını ve Dünya'nın zengin mineral çeşitliliğinin büyük bölümünün muhtemelen cansız bir dünyada var olamayacağını iddia ediyoruz. Bu bakış açısına göre, ikinci derecede değerli turkuaz, masmavi azurit ve parlak yeşil malakit, tartışmasız yaşam göstergeleridir.

Canlı dünyaya olan bu mineralojik bağlılığın nedenleri basittir. Bu güzel mineraller, binlerce başka türle birlikte, sıg kabuğun içinde, oksijen-yoğun suların ve önceden var olan minerallerin etkileşimleriyle oluşur. Yüzey altı suları, üstteki birkaç kilometrelik kayayı çözer, taşır, kimyasal olarak değiştirir veya düzeltir. Bu süreçte, yeni kimyasal reaksiyonlar ilk kez ortaya çıkar ve yeni mineral grupları oluşturur. Sverjensky ile birlikte, bu şekilde oluşan ve bakır, uranyum, demir, manganez, nikel, civa ve başka pek çok elementten üretilen minerallerin uzun listesini yaptık. Oksijenin yükselişinden önce, bu türden mineral oluşturan reaksiyonların gerçekleşmesi basitçe mümkün değildi.

"Peki ya kırmızı gezegen Mars?" diye soruyor meslektaşlarımız. Komşu gezegenimizin paslanmış yüzeyi Mars'ın oksitlenmiş olduğunun ve Dünya'dakine benzer derin bir mineral çeşitliliğe sahip olabileceğinin kanıtı değil mi? Cevabımız hayır. Temel

farklılık Mars'ın ve muhtemelen ona benzeyen diğer gezegenlerin Dünya'nın müthiş mineral çeşitliliğini oluşturan oksijen-yoğun *yüzey altı* sularının dinamik döngüsünü deneyimlememiş olmaları. Yakın zamana ait verilerin tetikleyici biçimde ortaya koyduğu gibi Mars üzerinde yer altı suyu stokları bulunabilir fakat bu su donmuştur. Mars'ın kırmızı olmasının tek nedeni, yüzeye yakın hidrojeninin (dolayısıyla suyunun) büyük bir bölümünü kaybetmiş olmasıdır. Hidrojen kaybıyla oluşan küçük miktarda oksijen yüzeye, kırmızı rengi verir, tıpkı ince bir resim tabakası gibi, fakat bu oksijen Mars gezegeninin kabuğunun fazla derinlerine nüfuz edemez.

Dünya'nın mineralojik geçmişine ilişkin yeni çerçevelendirmemiz, geçmişteki bazı görüşleri güçlendirdi. Kışkırtıcı biçimde "A Whiff of Oxygen Before the Great Oxidation Event?" başlığı verilen 2007 yılına ait bir *Science* makalesinde, jeokimyacı Ariel Anbar ve meslektaşları, Batı Avustralya'da bulunan Mc Rae Dağı'nda, 2,5 milyar yaşında siyah kil taşı dizisinde oluşan iz unsurlarını titizlikle belgeledi. Antik bir okyanusun açıklarında biriken bu ince katmanlı tortular göze tekdüze görünür fakat yakından incelendiğinde, kimyasal sürprizler içerir. En gözle görülür olanı, kil taşı tepesinin yakınındaki dokuz metrelik bir kısmın yoğun oranda molibden ve renyum (oksitlenmedikleri takdirde genellikle tortul kayalarda görülmeyen kimyasal elementler) içermesidir. Molibden ve renyumun daha oksitlenmiş biçimleri, nehirlerden okyanus zeminindeki siyah kil taşıyla birleşebilecekleri okyanusa akar.

Herkes bu molibden ve renyum zenginleşmesinin, bize 2,5 milyar yıl önceki erozyonla ilgili bir şeyler söylediği konusunda hemfikirdir. Molibdenin en sık görülen minerali olan (ve sıklıkla aynı zamanda renyum da içeren) molibdenit, sıra dışı ölçüde yumuşaktır ve kolaylıkla aşınır. Belki de molibdenit içeren bir granit, antik bir dağ yamacı üzerinde ortaya çıkmıştır. Belki mekanik ayrışma denize taşınan ve siyah çamurlu dibe çöken mikroskobik molibdenit parçaları (gömülecek ve McRae Shale Dağı'nı oluşturacak biçimde katılaşacak tortular) üretmiştir.

Anbar ve ekibi farklı bir sonuca ulaştı; ilksel fotosentetik hücrelerden alınan bir "oksijen dalgasının" işi yapan özne olduğunu

öne sürdüler. Belki de balçıklı yeşil hücrelerin bölgesel yoğunlaşması, molibden ve renyumu harekete geçirmek için yeterli oksijenle bir mikroçevre oluşturmuştu. Ne de olsa bundan 2,4 milyar yıl önce oksijenin küresel olarak yükseldiğine ilişkin tartışmasız kanıtlarımız var, öyleyse neden bölgesel olarak bundan 100 milyon yıl öncesi olmasın?

Sverjensky ve ben, molibden, renyum ve diğer elementleri harekete geçirmek için oksijen dışında çok çeşitli yolların olduğu görüşünü savunuyoruz. Sülfür, nitrojen ya da karbon içeren bilindik atmosfer molekülleri, elektron kabul oyununu, herhangi bir miktarda oksijenin yokluğunda da aynı şekilde oynayabilirlerdi. Yeni fikir ve argümanlar, alternatif iddia ve karşı argümanlarla karşılandığında bilimsel tartışmanın doğası bu şekildedir.

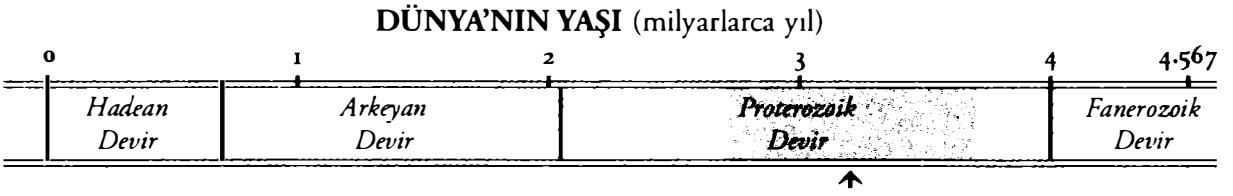
Oksijenin yükselişinin zamanlaması tam olarak nasıl olursa olsun, Dünya'nın iki buçuk milyarıncı doğum gününde, yüzeyi bir kez daha değişmişti. İlk dramatik değişiklikler toprak üzerinde, Dünya oksitlendiğinde gerçekleşti. Oksijen güdümlü yüzey ufalanması demir içeren granit ve bazaltı, kiremit kırmızısı toprak parçalarına ayırmaya başladı. Toprak yaşlandıkça, renk tonunu zarifçe başat olarak gri ve siyahtan canlı pas rengine dönüştürüyordu. Uzaydan bakıldığında, Dünya'nın iki milyar yıl önceki kıtaları (hâlâ bugünün kıtalarından bariz biçimde daha küçük olsalar da) modern kırmızı gezegen Mars'a benzer bir görünümde olabilirlerdi fakat dramatik ölçüde renkli zıtlıklar sunan mavi okyanuslar ve çalkantılı beyaz bulutlarla birlikte.

Pas, pek çok büyük mineralojik değişim arasında en gözle görülür olanıydı. Yakın zamana ait modellememiz, Büyük Oksitlenme Olayı'nın, her biri Güneş Sistemi'mizde önceden bilinen türler olan üç bin mineralin yolunu açtığını ortaya koyuyor. Yüzlerce yeni uranyum, nikel, bakır, manganez ve cıva kimyasal bileşimi, ancak yaşam sonrası oksijen üretme oyununu öğrendikten sonra ortaya çıkmıştır. Müzelerdeki en güzel kristal türlerin çoğu (mavi-yeşil bakır mineraller, mor kobalt türleri, sarı-turuncu

uranyum cevherleri ve diğerleri, güçlü biçimde yaşayan, canlı bir dünyadan söz eder. Bu yeni minerallerin oksijensiz bir çevrede oluşma ihtimali yoktur, dolayısıyla yaşam doğrudan ya da dolaylı olarak Dünya'nın bilinen dört bin beş yüz mineral türünden sorumlu görünür. Kayda değer biçimde, bu yeni minerallerden bazıları, yeni çevresel konumlar ve yeni kimyasal enerji kaynaklarıyla ilerleyen bir yaşam sağlamıştır, dolayısıyla yaşam sürekli olarak kayalar ve minerallerle bir arada ilerlemiştir.

Büyüleyici biçimde dönüştürücü bir element olan oksijen, bu çizilen tarihte başat rolü oynar. Elektronlara aç olan oksijen atomları, her türden minerale aktif biçimde tepki verir ve böylelikle kayaları aşındırarak bu süreçte yapı malzemesi bakımından zengin topraklar oluşturur. Atmosferdeki oksijen yoğunlaşmaları, iki milyar yıldan uzun bir zaman önce önemli düzeylere ulaştığında, tüm fotosentetik yaşam formları okyanuslarda yaşıyordu. Topraklar yaşamdan mutlak biçimde arındırılmıştı. Fakat oksijen yaşamın yerküre çapındaki nihai genişlemesinin yolunu açtı.

Bugün oksijen günlük pratiğimizin temel bir unsurudur. Aldığımız her nefesle birlikte, havanın küçük bir bölümü bir parçamıza dönüşüyor, hatta küçük bir parçamız havaya dönüşürken bile. Günler geçtikçe bedenlerimiz yok oluyor ve oksijenle ve yaşamın diğer temel unsurlarıyla anlık kimyasal reaksiyonlarla yeniden oluşuyor. Dokularımız yaşamlarımız boyunca tekrar tekrar yenileniyor, Dünya'nın sınırlı atom haznesi hava, deniz, toprak ve yaşayan tüm formları arasında yeniden işleme sokuluyor. Doğumunuz sırasında küçük bedeninizi oluşturan atomların büyük bölümü bugün dağılmış durumda, tıpkı bu oksijen-yoğun gezegende birkaç yıl daha yaşayacak kadar şanslıysanız mevcut atomlarınızın da yeniden dağılacağı gibi.



Sekizinci Bölüm

“Sıkıcı” Milyar

Mineral Devrimi

Dünya'nın Yaşı: 2,7 ila 3,7 milyar yıl arası

İlksel Dünya topluluğunun dinamik, dirençli tetikleyicisi Avusturyalı jeolog Roger Buick, bir seferinde (Büyük Oksitlenme Olayı'yla kesintiye uğrayan) Paleoproterozoik Dönem ve (küresel çaptaki buzulların yeryüzüne hâkim olduğunu ve yaşamın ilginç biçimlerde gelişmeye başladığını görecek olan) Neoproterozoik Dönem arasında sıkıştırılan dönemi şu kesin sözlerle özetledi: “Dünya tarihindeki en sıkıcı dönem Mezoproterozoik Dönem olmuş gibi görünüyor.”

Bu bölümün konusu, muhtemelen olaysız geçen, 1,85 milyar ile 850 milyon yıl öncesi arasındaki bir milyar yıllık dönemdir. Orta okyanus (ya da daha alaycı biçimde, bazı bilimsel akıllarca sıkıcı milyar) diye adlandırılan bu ara dönem, biyolojik ve jeolojik açıdan görece durgun bir dönem olmuş gibi görünüyor. İlk bakışta, kayanın geçmişi hiçbir epik, ezber bozan darbe ya da ani iklim değişikliği göstermez. Okyanusun daha oksitli olan yüzeye yakın katmanıyla oksijensiz okyanus derinlikleri arasındaki ara yüz, kademeli olarak gitgide derinleşmiş olabilir fakat temelde yeni olan hiçbir yaşam formu ortaya çıkmış görünmez; genel olarak pek çok yeni

kaya tipinin ya da mineral türünün ortaya çıktığı da düşünülmez. En azından yaygın inanış bu şekildedir.

Fakat *sıkıcı* riskli bir kavramdır. Bir keresinde lipitleri, yaşam moleküllerinin yağ ve parafin içeren zengin ve değişken sınıfını sıkıcı olarak nitelendirme hatasını yapmıştım. Bir konferans sırasında ve lipit kimyasının nüansları göz ardı edilerek yapılan bu yorum, iki açıdan hatalıydı. Öncelikle, lipitler, aslında şaşırtıcı ölçüde çeşitlidir. Yaşamın kimyasal reaksiyonlarının düzenlenmesinde ve girift nano ölçekli yapıların biçimlendirilmesinde her türden ilginç roller oynarlar. Lipitler çoğu canlının iç bölümleriyle dış bölümlerini ayırır. Onlar olmadan, bildiğimiz şekliyle yaşam mümkün olmazdı. İfademin yanlış olmasının ikinci nedeni, bunu bilinçsizce tüm araştırma kariyerini lipitler üzerinde çalışmaya adanmış dikkatli, şakadan hoşlanmayan bir kimyagerin önünde yapmış olmamdı. Haklı olarak beni eleştirdi ve olası yanlış anlamların önüne geçmek için bana bol miktarda oldukça teknik yayın gönderdi. Cezam bu ayrıntılı (ve oldukça sıkıcı) ciltleri okumaktı.

Konu, *sıkıcının* derin kayıtsızlık hâlimize herhangi bir içsel durgunluktan daha fazla hitap edebilmesidir. Aslında Dünya'nın sıkıcı milyarı, insan uygarlığının Karanlık Çağlar (Orta çağ) denilen dönemiyle, bir dönem bilim insanları çokça görmezden gelmiş olsa da büyük yenilik ve deneyimlerin, değiştirilemez ve geri dönüşü olmayan değişimin, canlı modern dünyaya açılan kapının o dinamik aralığıyla karşılaştırılabilir. Kayıtsızlığımız aynı zamanda kendi kendini güçlendiren bir unsur olabilir. Akademik saygınlıklarını lisansüstü eğitimiyle doktora sonrası araştırma burslarının geçici kısa döneminde inşa etme çabası içinde olan hırslı öğrenciler, çok fazla gelişmenin yaşanmamış olduğu düşünülen bir jeolojik döneme odaklanma eğilimi taşımaz.

Fakat bu esrarengiz çağın jeolojik katmanı, akıllı bilim insanları için sürprizler içermelidir. Dramatik dönüşümlerin ipuçları, öyküsü büyük oranda okunmamış olan kayalarda gizleniyor olmalıdır. Dünya'nın en değerli maden rezervlerinden bazıları –Afrika'da Zambiya ve Botsvana'dan, Kuzey Amerika'da Nevada ve Britanya Kolumbiyası'ndan ve Çek Cumhuriyeti ve Güney Avustralya'dan

geniş kurşun, çinko ve gümüş çökeltileri, bu devrin kayalarında birikmiş gibi görünür. Egzotik berilyum, bor ve uranyum minerallerinin yoğun miktarda bulunduğu diğer bölgeler de yaklaşık olarak bu dönemde gelişmiş gibi görünür. Ortaya çıkan kanıtlar Dünya'daki kıtaların sıkıcı milyar döneminde tek bir dev süper kıta olarak bir araya gelmiş, sonra ayrılmış, ardından gezegenin en görkemli yüzey döngüsünde yeniden bir araya gelmiş olabileceğini gösterir. Bu bir milyarlık ara dönemde de (bugün uygun biçimde fosiller olarak korunan) çok sayıda mikroorganizma kıyılarıdaki sığ bölgeleri ve kıyılardan uzak çevreleri dolduruyordu. Elbette Dünya'nın karanlık çağlarına ilişkin öğrenecek çok fazla şeyimiz vardır.

Bir Değişim Tarihi

Çarpıcı değişim, bugüne, Dünya'nın iki buçuk milyarıncı doğum gününden birkaç yüz milyon yıl sonrasına kadar, Dünya'nın evrimine ilişkin efsanemizde kalıcı oldu. Güneş nebulası birleşti ve Güneş oluştu. Çevresindeki toz onu eriterek kondrüllere dönüştürdü. Kondrüller gezegenimsi yapılar ve gezegenimsi yapılar da kilometrelerce çapta ilksel Dünya ve diğer karasal yapılar olarak kümelendi. Theia'nın darbesi, Ay'ın bunu izleyen oluşumu, akkor hâline gelmiş magma okyanusunun, yüzeyi binlerce patlayıcı volkanın oluşturduğu çukurlarla kaplı kararmış bazaltik bir kabuk olarak sertleşmesi, kısa sürede, yalnızca en uzun volkan koni tepelerinin kuru kalacağı ölçüde neredeyse tüm katı yüzeyleri kaplayan sıcak deniz -tüm bu çarpıcı olaylar- yarım milyar yıl içinde meydana geldi. Dünya'nın kendine özgü okyanusunun büyümesini izleyen daha az çalkantılı iki milyar yıl içinde bile, gezegenimizin yüzeyi sürekli bir değişim hâlindeydi; granit bazalt, eriyiklerden ortaya çıkıyor ve ilksel kıtalar levha tektoniğini yürüten ısı yayım hücreleri üzerinde geliyordu.

Yaşam böylesi dinamik ve değişken bir dünyada ortaya çıktı, gelişti ve sonunda oksijen üretmeyi öğrendi. Sürekli değişim Dünya'yı karakterize eden özellikti. Gezegenimiz, erken yetişmiş bir

sanatçı gibi, kendini tekrar tekrar yeniden inşa etmiş, her aşamada yeni bir şeyler denemişti.

O hâlde gezegenimiz kendisini nasıl durağan bir evreye saptanmış olarak buldu?

Basit cevap Dünya'nın o dönemde dahi durağan olmadığıdır. Değişim, belki Ay'ın oluşumuna yol açan darbe ya da Büyük Oksitlenme Olayı'nda olduğu kadar çarpıcı olmasa da kesintisizdi. Sıkıcı milyar, yeni türde kayalar ve değerli maden filizi tortuları oluşturan farklı süreçlerin bulunuşunun yanı sıra pek çok yeni mineral türünün ilk kez ortaya çıkışına da tanıklık etti. Ayrıca oldukça kritik biçimde tüm dünyadan elde edilen jeolojik veriler, bunun bugün hâlâ yürürlükte olan yeni şablonlar inşa edecek olan örgütlü bir küresel levha hareketi dönemi olduğunu ortaya koymaktadır.

Süper Kıta Döngüsü

Jeolojik açıdan konuşacak olursak, Dünya'nın bilindik okyanuslar ve kıtalar coğrafyası kısa ömürlüdür. Güçlü Atlantik Okyanusu'nu çevreleyen Kuzey, Orta ve Güney Amerika, Avrupa ve Afrika; Asya kıtasının doğu yönünde aşırı ilerleyişi; güney adalarının bolluğu ve Avustralya kıtasıyla genişleyen Pasifik Okyanusu ve Antarktika kıtası anlık birer yapılanmadır. Levha tektoniğinin gösterişli süreci kıtaları yalnızca oluşturmaz, aynı zamanda yerküre çapında onlar arasında durmaksızın mekik dokur. Kara ve suların görünimleri defalarca aşırı oranlarda değişmiştir.

Seçkin bir jeologlar grubu dünyamızın antik, yabancı kartografyasını açıklığa kavuşturmayı öğrenmiş ve bir zamanlar var olan ve gelecekteki Dünya'nın, tahmini olmakla birlikte, önemli haritalarını oluşturmuşlardır. Ellerinde üzerinde çalışabilecekleri pek çok ipucu vardır. Öncelikle, kıtaların bugün nasıl, ne ölçüde hızlı ve hangi yönlerde hareket ettiğini biliyoruz. Atlantik her yıl daha da genişliyor, Afrika ikiye ayrılıyor ve biz büyülenmiş hâlde izlerken, Hindistan Çin'e çarpıyor ve darbe bölgesini sarp Himalaya Dağları'na çökertiyor. Elbette bunların tümü yavaş yavaş fakat düzenli olarak, her yıl birkaç santim şeklinde gerçekleşiyor; birkaç

milyon yıllık bir dönemde, bir salyangozun ilerleyişi bile muazzam değişikliklere yol açabilir. Dünya coğrafyasının hayali kasetini bir geri bir ileri sarıyor ve gezegenimizin değişken yüzünün özelliklerini tahmin edebiliyoruz. Yarım milyar yıl kadar uzak bir geçmişte bile, hayvan ve bitkilerin zengin fosil kalıntıları bilim insanlarının bir resim çizmesine yardımcı olabilir, özellikle birbirinden çok ayrı kıtaların flora ve faunasının farklı evrimsel yollar izlediği dönemlerde. Örneğin Avustralya'nın değişik keseli hayvanları ve Yeni Zelanda'nın uçamayan büyük kuşları, zoolojik ayrıışmışlığın inandırıcı bir öyküsünü anlatır.

Beş yüz milyon yıldan uzun bir geçmişe gidildiğinde, resim sararmaya başlar; farklı türde ipuçları aramamız gerekir. Volkanik kayaların içine kilitlenmiş fosil manyetizması özel bir önem taşır. Gezegenimizin manyetik alanı hakkında bir pusula iğnesinin hizalanmasından aşına olunan kuzey-güney yönelimi bağlamında düşünme eğilimindeyizdir fakat durum bundan daha karmaşıktır. Manyetik alan çizgileri Dünya'nın yüzeyiyle dalım denilen bir açıyla kesişir. Dünya'nın Ekvator bölgesinde dalım sıfıra yakındır -neredeyse yatay- fakat daha yüksek enlemlerde, kutuplarda, neredeyse dikey hâle gelecek kadar dikleşir. Dolayısıyla volkanik bir kaya şeklinde donan antik manyetik alanın ölçümlerinin netleştirilmesi hem kuzey-güney yönelimini hem de bu kayaların sertleştiği dönemde kıtanın hangi enlemde olduğunu açığa çıkarabilir. Bu türden somut kanıtlar, gözle görülür biçimde, bugün Ekvator bölgesinde olan bazı kayaların bir zamanlar Dünya'nın kutuplarına yakın olduğunu ve bunun tersinin de geçerli olduğunu gösterir. Antarktika'daki eski tropikal lagünlerin fosil kanıtları ve ekvatorial Afrika'daki donmuş tundra toprağı bu türden bulguları güçlendirir. Tortul kaya kalıntıları oldukça önemli veriler ekler. Farklı türde tortular farklı çevrelerde birikir: Sığ denizler, kıta sahanlıkları, tundra, buzul gölleri, gelgitsel lagünler ve bataklıkların her biri özel kaya türlerine sahiptir.

Paleocoğrafya alanındaki uzmanlar, bu ipuçlarıyla, zamanda daha da gerilere, ilk kıtaların oluşumuna kadar uzanan, bilgiye dayanan tahminlerle birlikte, Dünya'nın en az 1,6 milyar yıl

öncesindeki tutarlı ve savunabilir bir resmini oluşturmayı başarmışlardır. Levha tektoniğinin özgün kıtaları oluşturması uzun zaman almıştır. Dalmanın uç noktasında, Dünya'nın en eski bazalt kabuğunun kalın tabakalarının manto derinliklerine düştüğü fay hattında, düşük yoğunluklu batmayan granit adaları parçaları git-tikçe daha geniş, sabit, uzun ömürlü kara parçaları oluşturacak biçimde üst üste yığılmıştır. Bugün kıtaları oluşturan bu antik parçalar *kraton* diye adlandırılır, bu Yunanca "direnc" sözcüğünden türetilen bir kavramdır.

Kratonlar güçlüdür; bir kez oluştuklarında, uzun süre varlıklarını korurlar. Bugün Dünya'da az çok bütünlüklü üç düzine kraton bulunmaktadır, bunların bazıları 3,8 milyar yaşına ulaşmıştır ve boyutları yüz altmış kilometreyle bin altı yüz kilometreden fazlası arasında değişir. Her biri çağrıştırmalı biçimde isimlendirilen (Kuzey Amerika'da "Slave" ve "Superior," Afrika'da "Kaapvaal" ve "Zimbabwe" ve Avustralya'da "Pilbara" ve "Yilgarn") farklı parçalar, dünya çapında milyarlarca yıllık göçmenliği deneyimlemiştir. Çok sayıdaki daha küçük antik parçayla birlikte bir araya getirilerek ve ayrılarak, kıtaların temel taşları olarak varlıklarını sürdürürler. Grönland'ın büyük bölümünde, yanı sıra Kanada'nın merkezi, Michigan ve Minnesota'nın kuzey bölgelerinin büyük bölümünde bulunan bu türden üç kraton, diğerlerinden yarım düzinelik bir kümeyi kapsar. Brezilya ve Arjantin'in büyük bölümleri çeşitli kratonlar altındadır, tıpkı Kuzey, Batı ve Güney Avustralya, Sibirya, İskandinavya, Antarktika'nın büyük bölümü, Doğu ve Güney Çin'in ayrı bölgeleri, Hindistan'ın büyük bölümü ve Afrika'nın batı, güney ve ortasının farklı alanları gibi. Bu kratonların tümü üç milyar yıldan uzun süre önce- modern tarzdaki levha tektoniğinden önceki bir dönemde, Dünya yüzeyinin yalnızca küçük bir bölümü kuru toprak parçasıyken oluşmaya başlamıştır. Sonuç olarak tüm kratonlar Dünya'nın hayat dolu gençlik döneminin bir şekilde çarpık ve karmaşık olsa da değerli geçmişi taşıyor.

Kratonlar ilksel Dünya tarihinin kilit noktaları- Rosetta taşlarıdır. Okyanuslar ilksel Dünya'yı çözmemize yardımcı olamaz. Levha tektoniğinin, okyanus sırtlarında yeni bazalt kabukları oluşturan

ve bunu birbirlerine yaklaşma eğilimindeki sınırlarda yutan kesintisiz taşıyıcı kuşağı sayesinde, en yaşlı okyanus kabuğunun yaşı iki yüz milyondan çok daha fazla değildir. Bundan daha yaşlı olan her şey ya kıtalar üzerinde korunmalı ya da hiç korunmamalıdır.

Gezici kratonların olağanüstü karmaşık bir tarihi vardır. Tektonik levhaların devinimleriyle hareketlenen bu kratonların yerleri değişmiş, birleşik kratonlar ve süper kratonlar oluşturacak biçimde birbirleriyle çarpışmışlardır, bunlar da sonuçta dönem dönem tekil dev kara parçaları (kıtalar ya da süper kıtalar) şeklinde kümelendi. Her çarpışma kenet kuşağında yeni sıradağların oluşumuyla sonuçlanmıştır; her dağ sırası daha geniş kara parçalarının antik birleşimine ilişkin ikna edici kanıtlar sunar.

Bunun sonucunda süper kıtalar yarılarak birbirlerinden uzaklaşmış ve birbirlerinden ayrı, okyanusa bağlı ada kıtaları oluşturmuştur. Bir kıtanın yarıldığı her durumda, birbirinden ayrılan parçalar arasında genişleyen bir okyanus oluşur ve belirleyici bir tortu grubu birikir: Başlangıçta sığ su kum taşı ve kireç taşı, sonrasında derin su çamuru ve siyah kil taşı. Bu tortul sonuçlar kıtasal bölünme olaylarına işaret eder. Kıtalar tekrar tekrar tıpkı demir gibi dövölmüş ve sonrasında birbirinden ayrılmıştır. Bu, parçaların sürekli konum ve şekil değiştirdiğı, resmin ne olduğunun bilinmediğı çok büyük bir yapbozdur.

Peki, tüm bunların sıkıcı milyarlar ne ilgisi var? Her anlamda ilgisi var. Göze çarpan aktivite işaretlerinden bağımsız (jeolojik tarihte gösterişli bir flora ve fauna oluşumundan önceki darbelerden bağımsız, ağaçsız) bir dönemin neye benzediğini kavrayabilmek için paleocoğrafyacılardan yardım almamız gerek. Bu jeologlar, kratonların yerküre çevresindeki milyarlarca yıllık dansının ayrıntılarını çözebilmek için, Dünya'daki en uzak noktalara yolculuk ediyor, örnekler topluyor ve daha sonra bunları bir laboratuvar testleri serisine tabi tutuyor.

Her kratonun merkezinde, tipik olarak üç milyar yıllık ya da bundan daha büyük, gerçekten yaşlı kayalar yer alır. Dünya'nın

en eski kabuğunun bu parçaları, toplamda Dünya'nın kıtasal kütlelerinin yalnızca küçük bir bölümünü temsil eder. Tümü sıcağa ve basınca maruz bırakılmış, yer altı sularının eritici güçleriyle değişmiş ve kabuk baskılarıyla eğrilmiştir. Bu durumda dahi, ister granit benzeri müdahaleler ister tortul katmanlar olsun, özgün kayaların doğası sıklıkla ortaya çıkarılabilir. Dahası, kratonların durağan olmayışı bir şanstır. Yeni magma titreşimleri, tarihleri boyunca, eskilere nüfuz eder; damar ve kabuklarda volkanik kaya yapıları oluşturur. Yeni tortul çökeltiler iç bölgelerde, göl ve nehirlerde, yanı sıra sığ, kumlu sahil şeritlerinde oluşur. Ayrıca farklı kaya tipleri ve karakteristik yapılar, kratonların birleştiği ya da ayrıldığı (iki kara parçasının göreceli hareketlerini gösteren olayların olduğu) her durumda ortaya çıkar. Bu daha genç farklı oluşumlar üzerinde yapılan dikkatli çalışmalar, bir kratonun bütün tarihini kapsayan kaya tipleri grubunu ayırt edebilir. Sonrasında eğlence başlar.

Daha genç kayalar kraton hareketlerinin kronolojisine ilişkin ipuçları sunar. Magmatik kayalar katılaştıklarında, Dünya'nın manyetik alanının yönünde kilitlenen küçük manyetik mineraller içerir. Dikkatli paleomanyetik çalışmalar, yalnızca daha önceki kuzey ve güney kutuplarının yönünü değil, kayaların soğuduğu zamanki ortalama enini de belirleyebilir. Bu veriler, tam olarak GPS koordinatları olmasa da kratonların zaman içindeki göreceli konumlarını kaydeder. Tortul kayalar bu verileri tamamlar, çünkü iklim ve ekolojiye ilişkin belirleyici ipuçlarına sahip olabilirler. Hızla aşınan tropikal bölgelerde biriken tortular, daha yüksek bölgelerdeki ılıman göller ya da buzul çökeltilerinden oldukça farklıdır. Bazı tortul kayalarda aynı zamanda kutupsal konumlara ilişkin ipuçları içeren küçük manyetik mineral parçaları bulunur.

Dünya'nın değişen yüzüne dair belirsiz bir fikir edinebilmek için bile, üç düzine kratonun her biri, sayısız jeolog tarafından incelenmektedir. Onlarca yıl süren incelikli saha ve laboratuvar çalışmaları yürütülmekte, gezegenin her yerinden veriler bir araya getirilmektedir. Sonrasında tüm kratonların bir küre üzerinde çarpışan arabalar gibi yan yana dizilmesi gerekecek ve hareketlerinin,

modern dünyanın coğrafyasından başlayan hayali filmi, yavaş yavaş geriye doğru oynatılacaktır. Biz daha fazla geriye gittikçe, bu film de kaçınılmaz olarak daha belirsiz ve spekülatif hâle gelecektir. Bununla beraber, yavaş yavaş ortaya çıkmaya başlayan resim sıra dışıdır. Son yorumlara göre, Dünya, en az beş süper kıta birleşme ve ayrılmasının, belki üç milyar yıl geriye uzanan tekrarlı bir döngüsünü deneyimlemiştir.

Dünya'nın ilk kara parçaları hâlâ ortaya çıkmakta ve konu üzerinde birkaç tartışmadan fazlası yürütülmektedir. En azından şimdiye dek hiç kimse, Dünya'nın üç milyar yıl önceki yüzeyinin bir eskizinden fazlasını çizmeye cesaret etmemiştir fakat titizlikle irdelenmiş bir fikirle, yaklaşık 3,1 milyar yıl kadar önce, bugünkü Güney Afrika, Avustralya, Hindistan ve Madagaskar'ın geçmişteki dağılmış kratonik parçalarından oluşan kıta boyutundaki bir kara parçasına "Ur" adı verilmiştir. (Varlığı daha da eski bir dönemde kabul edilmiş geniş bir kara parçası olan Vaalbara, yaklaşık 3,3 milyar yıl kadar önce var olmuş olabilir fakat kanıtlar zayıftır.) Ur'u oluşturan tüm bu bölgelerden gelen paleomanyetik verilerin karşılaştırmalarına göre, bugün ayrı olan kratonlar Dünya tarihinin büyük bölümü boyunca birleşik hâlde olmuştur; küresel dolaşımları neredeyse paralel, dolayısıyla muhtemelen bağlantılı görünür. Gerçekten de manyetik veriler Ur kıtasının yaklaşık 3 milyar yıl boyunca varlığını sürdürdüğünü ve ancak bundan yaklaşık 200 milyon yıl önce parçalanmaya başladığını ortaya koyar.

Kuzey Amerika'daki ilgili kaya konumlarıyla ilişkili olarak Kenorland ya da Superia diye adlandırılan ilk gerçek *süper* kıtanın, bundan yaklaşık 2,7 milyar yıl kadar önce, Ur ve başka pek çok küçük parçadan oluştuğu düşünülmektedir. Bir kratonun bir başka kratonla çarpıştığı her durumda bir kenet kuşağı oluşmuş, öte yandan epik sıkışma bölgeleri yeni sıradağlar oluşturmıştır. Bu tür özelliklerin fazlalığı, yaşları 2,7 ile 2,5 milyar yıl arasında değişen kayalar dikkate alınarak belirlenebilir; bu, süper kıtanın ardışık büyümesini ortaya koyar. Paleomanyetik veriler, Kenorland'ın görece kısa varlığının büyük bölümünde, aşağı enlemde olduğunu, muhtemelen Ekvator'un her iki tarafında bulunduğunu açığa çıkarır.

Bu ilk toprak parçalarıyla birlikte, Dünya'da geniş çaptaki ilk erozyon olayları ve tortuların sığ okyanus kıyılarına ilk büyük darbeleri başlamıştır. İlkse Dünya modelleyicilerinin büyük bölümü, bugünkünden oldukça farklı antik bir atmosfer olduğunu ortaya koyar. Hiç oksijen yoktu, öte yandan karbondioksit düzeyleri şimdikinden yüzlerce ya da binlerce kat daha fazla olmuş olabilir. Yağmur, toprağı aşındıran ve sert kayayı yumuşak çamura dönüştüren karbonik asit şeklinde yağıyordu. Nehirler çamurlu yüklerini, çevrelerindeki okyanusların delta benzeri kalın yumuşak tortu yarıklarının biriktiğı sığ kıyı yamaçlarına taşıyordu.

Yaklaşık 2,4 milyar yıl kadar önce, oksijenin atmosferde birikmeye başlamasıyla az çok aynı dönemde, Kenorland süper kıta oluşumunun diğer tarafını deneyimledi. Kenorland'ın uzun süreli bölünmesi başlarken, jeomanyetik veriler Ur'un diğer kratonlardan farklılığını açığa çıkarır. Bu kratonik yapboz parçaları Ekvator'dan kutuplara saçıldı. Ayrılan parçalar arasında yeni sığ denizlerin açılması, sığ deniz tortularının yoğun birikintilerinin oluşumuyla sonuçlandı. Süper kıta döngüsü başlamıştı.

Merhaba Kolombiya

Süper kıta döngüsünün jeolojik olaylara eklenmesi sıkıcı milyarı çok daha az sıkıcı hâle getirmiştir. Kenorland'a göre daha fazla incelenen bir sonraki süper kıta evresi, daha genç ve çok daha iyi korunmuş kaya grupları sayesinde, bundan yaklaşık iki milyar yıl kadar önce, Dünya'nın kıta boyutunda en az beş ayrı kara parçasına sahip olduğu dönemde başlamıştır. Bunlar arasında en büyüğü Laurentian süper kratonu, bugün Kuzey Amerika'nın orta ve doğu bölümünü kaplayan binlerce kilometrelik en az yarım düzine kratonun bir araya gelmiş hâliydi. (Antik kara parçaları alanındaki uzmanlar bazen bu kratonlar topluluğunu Amerika Birleşik Levhaları diye adlandırır.) Özgün kıta Ur, Laurentia'dan büyük bir okyanusla ayrılan ikinci büyük kara parçası olarak varlığını sürdürmüştür. Bugün Avrupa'nın doğusu olan bölgenin özünü oluşturan çok daha küçük Baltık ve Ukrayna kratonları ve bugünün Güney

Amerika, Çin ve Afrika'sının farklı bölümlerini temsil eden kratonlar da kıta boyutuna yaklaşan geniş adalardı. Dünya 1,9 milyar yaşına eriştiğinde, bu farklı toprak parçaları çakışan levha sınırlarında çarpışmış, yeni dağ kuşakları ve çeşitli şekillerde Columbia, Nena, Nuna ya da Hudsonland adı verilen bir süper kıta oluşturmuştur. (Washington-Oregon sınırındaki Columbia Nehri bölgesinden elde edilen güçlü jeolojik kanıtlar üzerine temellenen Columbia ismi, en sık kullanılan isim gibi görünüyor.) Kuzeyden güneye kabaca iki yüz doksan bin kilometre uzunluğunda ve dört bin sekiz yüz kilometre genişliğinde olduğu tahmin edilen bu geniş açık bölge, Dünya'nın kıtasal kabuğunun neredeyse tamamını içeriyordu.

Otuz ve daha fazla sayıda kratonik parçayı tek bir yok olmuş süper kıta için geriye dönük bir şekilde düzenlemenin yarattığı karmaşalar ürkütücüdür. Şaşırtıcı olmayan biçimde, sıklıkla bir modelden fazlası kabul görmek için yarışır. Kolombiya söz konusu olduğunda, 2002 yılında, neredeyse aynı anda birbirinden oldukça farklı iki öykü ortaya çıkmıştır. Bir yandan Kuzey Carolina Üniversitesi'nden jeokimyacı John Rogers ve Hintli meslektaşı Santosh Madhava Warriar (Japonya'daki Kochi Üniversitesi'nden) bugün Kuzey Amerika'nın büyük bölümünü oluşturan Laurentia'nın Kolombiya'nın özünü oluşturduğunu iddia etti. Rogers ve Santosh'a göre, Ur kıtası Laurentia'nın batı kıyısına bağlanmıştı; Sibirya, Grönland ve Baltık'ın farklı bölgeleri kuzeyde konumlanmıştı ve bugün Brezilya ve Batı Afrika'nın olduğu yerin farklı bölgeleri de güneydoğuya uzanıyordu. Aynı yıl içinde, Hong Kong Üniversitesi'nden Guochun Zhao ve pek çok meslektaşı, Baltık Laurentia'nın doğu kıyısına yaslanırken Antarktika'nın doğusunun ve Çin'in batıya bağlandığı farklı bir yapı geliştirdi. Kolombiya'nın oldukça büyük yaşı ve bu yeniden yapılandırmaların ilksel doğası göz önünde bulundurulduğunda, iki bilim ekibi arasındaki uzlaş, gözle görülür ölçüde iyidir. Ancak, onlarca yıl boyunca kabul edilmiş kraton bölgeleri karıştırıldıkça ve değiştirildikçe pek çok tartışma olmasını bekleyebiliriz.

Her durumda, 1,9 milyar yıl önce oluşmaya başlayan Kolombiya topluluğu sıkıcı milyar için gerekli ortamı oluşturdu. Kolombiya süper kıtasının yapısal ayrıntıları aslen ne olmuş olursa olsun, iç bölgesinin büyük bölümünün kesinlikle hiçbir bitki örtüsünün bulunmadığı ve geniş kırmızı çöl alanlarının olduğu sıcak, kurak bir bölge olduğundan oldukça emin olabiliriz. Dünya, daha da geniş (bununla beraber henüz isimlendirilmemiş) mavi bir süper okyanusla çevrili olan büyük kırmızı kara parçalarından biriyle, uzaydan bakıldığında tuhaf biçimde eğik görünüyormuş olmalıydı. Tüm kıtaların Ekvator yakınlarında toplanmış olmasının yanı sıra, kutuplarda ancak az miktarda buz bulunuyordu. Buna karşılık okyanus seviyeleri, belki bazı kıyı bölgelerini sığ iç denizlerle istila edecek kadar yüksekti.

Ekvator bölgesindeki Kolombiya süper kıtası Dünya tarihinin en durgun döneminin varsayılan başlangıç noktasıdır fakat bu dönem bu kadar durağan kılan şey nedir? *Durağanlık* gerçekte ne anlama gelir- hangi parametreler durağandı? Küresel iklim ve yağış mı? Yaşamın doğası ve dağılımı mı? Okyanus ya da atmosferin yapısı mı? Bu durağanlık denilen şeyi belirlemek için ne tür ölçümler yapılmıştır? Buna karşılık, ne tür belirsizliklere değinilmemiştir?

Durağanlık

Jeoloji lisansüstü öğrencilerinin büyük bölümü, 1,85 milyar ila 850 milyon yıl öncesi arasındaki kaya oluşumlarını basitçe göz ardı eder. Dört yıl, bir doktorayı tamamlamaya, ilgi çekmeye ve kalıcı kadrolu bir işe sahip olmaya çalışırken, bu türden tartışmaya açık bir jeolojik dönemde geçirmek için oldukça kısa bir zamandır. Fakat Linda Kah çoğu lisansüstü öğrencisine benzemiyordu. Massachusetts Teknoloji Enstitüsü'ndeki lisans dönemi danışmanı, Dünya'nın iki milyar yıl öncesindeki en eski kayaları üzerinde yapılan çalışmalar konusundaki lider ismi John Grotzinger'di. Harvard'daki doktora danışmanı (Nora Noffke'yi mikrobik mat araştırması için cesaretlendiren tanınmış paleontolog) Andy Knoll'du. Kah, Grotzinger'in tanımladığı 1,8 milyar yıldan daha yaşlı olan Dünya'nın,

Knoll'un tanımladığı 0,8 milyar yıldan daha genç olan Dünya'dan oldukça farklı olduğunu kaçınılmaz bir şekilde fark etti. Sıkıcı milyar döneminde ilginç bir şeyler olmuş olmalıydı ve Kah bunun ne olduğunu bulmakta kararlıydı. Böylece kendisini Mezoproterozoik Dönem'i (Dünya tarihinin 1,6 milyar yıl öncesinden 1 milyar yıl öncesine uzanan geniş zaman dilimini) sıkıcı milyarın büyük bölümünü kapsayan bir dönemi anlamaya adanmıştı.

Mezoproterozoik Dönem aslında bir durağanlık evresi olsa da bir milyar yıllık bir denge kayda değer olacaktı. Değişim, Dünya'nın öyküsünün temel konusudur. Okyanuslar, atmosfer, jeosfer ve biyosfer (gezegenimizin tüm yönleri) çağlar boyunca durmadan değişmiştir. Dünya bir milyar yılı hiçbir dramatik olay, yüzeye yakın çevrelerde hiçbir bariz geçiş, canlı ya da cansız dünyada hiçbir büyük yenilik olmadan nasıl deneyimleyebilirdi? Gerçekten de iklimin ve yaşamın tüm geri bildirimlerinin böylesi kusursuz biçimde uyumlu bir denge içinde olduğu bir milyar yıllık bir dönem var mıydı? Böyle bir şey nasıl olmuş olabilirdi?

Tennessee Üniversitesi kampüsü yakınlarında, sakın bir kahvaltı toplantısında, Linda Kah Dünya'nın çarpıcı ve tekrarlanan dönüşümlerini (dolayısıyla Mezoproterozoik Dönem'in neden hiç sıkıcı olmadığını) sabırla açıklıyor. 21 X 27 santimetrelilik boş beyaz kâğıt yığınıyla hazırlanmış olarak geliyor; konuşurken, mavi ve kırmızı mürekkeplerle muntazam açıklayıcı şemalar çiziyor.

"On yıl önce de bu fikirlere sahiptim," diyor, Afrika'nın kuzeybatısındaki Moritanya çöllerinin kötü Mezoproterozoik bölgele-
rindeki zorlu saha çalışmasının ürünlerini anlatırken. Bugün geri dönmek isterdi fakat soygunculuğun ve kaçırma olaylarının artışı bu türden bir saha gezintisini sorunlu, çılgınca hâle getiriyor. Bunun yerine bir sonraki Mars bilim ekibinin bir üyesi olacak ve bu şekilde daha güvenli bir seçim yapmış olacak.

Kah'ın bilimsel öyküsü levha tektoniği ve Dünya'nın geçmişinde yarattıkları karmaşaya (toprak parçalarının Dünya'nın yüz milyon yıllık dönemler içinde radikal ölçüde farklı görünmesine yol açan sürekli yer değiştirmesi, bölünmesi ve eklemlenmesine)

odaklıdır. Sıkıcı milyarın olduğu üç yüz milyon yıllık ara dönemlerde (süper kıta Kolombiya'nın az çok bütünlüklü olarak kaldığı dönemde) bile levha tektoniği durmamıştır. Süper kıtaların kayda değer bir özelliği, okyanus levhaları sınırlarının altına dalarken ve sahillere yakın bölgelerde yeni yanardağlar oluşurken yavaş yavaş büyümeyi sürdürmeleridir. Rainier, Hood ve Olympus Dağı gibi görkemli yanardağların hâlâ aktif olduğu Pasifik Kuzeybatı bölgesinin günümüzdeki genişlemesi, bu asırlık olgunun yakın döneme ait örneklerinden biridir. Kolombiya'nın genişleyen sınırları için de aynı şey geçerliydi.

Kolombiya epizodik parçalanmayı, daha küçük kıta ve adalara bölünmeyi deneyimlediğinde de Dünya'ya daha fazla kıtasal kabuk eklendi. Yaklaşık 1,6 milyar yıl kadar önce (Mezoproterozoik Dönem'in başlangıcında) Ur kıtasının Laurentia'dan batıya ve Kolombiya'nın geri kalan bölümünün doğuya ayrılması büyük bir kratonlar arası denizle kalınlığı on kilometreyi aşan büyük tortu yığınlarının oluşumuyla sonuçlandı. Belt-Purcell süper grubu diye adlandırılan bu güçlü tortu, bugün Kanada'nın batısının büyük bölümünde ve Amerika'nın kuzeybatısında göze çarpan çıkıntılar oluşturur. Dolayısıyla, süper kıtalar ayrılırken ve aşınırken bile, eski kıtasal kayalardan yenileri oluşturuluyordu.

Kolombiya'nın birbirinden ayrı iki kara parçasına bu şekilde ayrılmasının farklı sonuçları oldu. Laurentia, Ur ve diğer kıtalar hâlâ bütünüyle az çok Ekvator çevresinde toplanmıştı, bu da kutuplarda hâlâ hiç kalın buz artışı ve kıta olmadığı, okyanus seviyelerinin de hâlâ görece yüksek olduğu anlamına gelir. Gerçekten de sığ denizler Laurentia'nın yeni batı kıyısının geniş alanlarını kaplıyordu; Dünya yüzeyinin dörtte birden az bir kısmının kuru olması olasıydı. Muhtemelen iki yüz yılı aşan bir dönemde, Dünya'nın toplamdaki alanı dramatik ölçüde azalırken, yoğun tortul yataklar (bugün belirleyici tortul kayıtları olarak korunan birikintiler) Dünya çevresindeki sığ sularda birikiyordu. Hiç buzun olmaması aynı zamanda hiç buzulun olmaması demektir. 1,6 milyarla 1,4 milyar yıl arasındaki ara dönemde karakteristik buzul kalıntılarından (pek çok başka jeolojik devirde bulunan buzlarla çevrili

taş ve kayalardan, kum ve çakıllardan) hiçbir iz yoktur. Dolayısıyla, bu değişiklikler jeolojik anlamda "her zamanki işler" olsa da duran Mezoproterozoik Dönem'de çok fazla değişim yaşanmıştır.

Süper Kıta Tekrarı: Rodinia Topluluğu

Sıkıcı milyar bir değil iki süper kıtanın oluşumuna tanıklık etti. Kolombiya'nın saçılan parçaları muhtemelen 200 milyon yıl boyunca birbirinden uzaklaştı fakat bir kıta yerküre üzerinde, yeniden birleşmeye başlamadan önce ancak bu kadar uzun süre birbirinden uzaklaşabilir. Yaklaşık 1,2 milyar yıl kadar önce Ur, Laurentia ve diğer Mezoproterozoik kıtalar (Rusça "ana vatan" ya da "doğum yeri"nden esinle) Rodinia adındaki yeni bir toprak parçasında yeniden birleşmeye başladılar. Avrupa, Asya ve Kuzey Amerika'daki ücra bölgelerin kaya kayıtları, 1,2 milyarla 1 milyar yıl öncesi arasındaki dağ oluşumlarının dünya çapında bağlantılı bir etkisini içerir; birleşen kratonlar çarpıştıkça ve çöktükçe her yeni dağ sırası yükselmiştir.

Rodinia'nın net coğrafyası hâlâ bir tartışma konusudur fakat jeolojik ve paleomanyetik veriler, bugünün yerküresindeki kratonların düzenlenmesiyle birlikte bariz sınırlamalar oluşturur. Çoğu modelde, Laurentia'nın (yani bugünkü Kuzey Amerika'nın büyük bölümünün) merkezde olduğu ve tüm diğer kıtalardan geniş parçaların kuzey, güney, doğu ve batıya yapıştırıldığı biçimde, bütün bir süper kıta Ekvator'un yakınında konumlandırılır. Çeşitli yeniden yapılandırmalara göre, Baltık ve bugün Brezilya ve Batı Afrika'yı oluşturan bölgelerin bazı kısımları güneydoğuya, Güney Amerika'nın diğer bölümleri güneye ve Afrika'nın parçaları güneybatıya yaslanmıştır, ancak Avustralya, Antarktika, Sibirya ve Çin'in göreceli konumlarının ayrıntıları henüz netleşmemiştir.

Rodinia'nın ayırt edici özelliği, içinde belirli türde kayaların bulunmayışıdır. Geçmiş 3 milyar yıldaki herhangi bir ara dönemden farklı olarak, yaklaşık 1,1 milyarla 850 milyon yıl öncesi arasındaki ara dönemde korunan tortu birikintileri varsa bile az miktardadır. Bu ara dönem, 1,6 milyar yaşındaki Belt-Purcell süper

grubuna ev sahipliği yapan türdeki kıtalar arasında, muhtemelen hiç sığ deniz olmadığı anlamına gelir. Sonuç: Kıtalar uyumlu bir bütün oluşturmuş olmalıdır. Bir zamanlar Kuzey Amerika'nın merkezinin tamamını sular altında bırakan ve 100 milyon yıl kadar önce Büyük Ovalar'ın tortul temellerini oluşturan türden geniş iç denizler de yokmuş gibi görünür. Bu modele göre, Ekvator bölgesindeki Rodinia'nın, bugünün Avustralya'sına oldukça benzer biçimde sıcak, kuru, çöle benzer bir iç bölgesi vardı. Yaklaşık 250 milyon yıl boyunca, tortul kaya döngüsü neredeyse durmuş gibi görünür.

Linda Kah, fikirlerini düzenli olarak ifade eder fakat seçilmiş jeolojik ara dönemi konusunda tutkulu olduğu açıktır. Sona yaklaşırken gerçekleşen yetersiz kaya kaydına karşın, 1,85 milyar öncesiyle 850 milyon yıl öncesi arasındaki geniş zaman aralığında, kratonik dansın bir sonucu olarak pek çok kayda değer değişiklik gerçekleşti. İki süper kıta sıkıcı milyar döneminde birleştirildi ve her biri kratonik çarpışmalar yoluyla bir düzine sıradağ oluşturdu. Toprakların birleştiği bu iki dönem arasında, Kolombiya süper kıtası bölünürken, Dünya'nın en etkileyici tortu dizilimlerinden bazıları oluştu. Dünya topraklarının büyük bir bölümü sular altında kaldı ve sonra yeniden kurudu. Çökelme oranları büyüklük sırasına göre farklılık gösteriyordu. Buz tabakaları ortadan kayboluyor ve yeniden ortaya çıkıyordu. Bu "sıkıcı" bir çağ için oldukça büyük bir değişikliktir. Fakat öykünün başka bir tarafı daha vardır.

Aradaki Okyanus

Yerkürenin net geometrisi ne olursa olsun, herkes Rodinia süper kıtasını daha da geniş bir süper okyanusun, (Rusça "küresel" sözcüğünden esinle) Mirovia adı verilen bir yapının çevreliyor olması gerektiği konusunda hemfikirdir. Yeryüzünün geçmişi üzerine çalışan jeokimyacılar, şayet Mezoproterozoik Dönem sıkıcıysa, Mirovia'nın bunun temel nedeni olduğu sonucuna varmıştır.

Dünya'daki tüm diğer dönemlerden ayrı olarak, 2,4 milyar yıllı 1,8 milyar yıl arasındaki dinamik dönem oluşturan Büyük

Oksitlenme Olayı, öncelikle atmosfer kimyasında değişikliklerin olduğu bir dönemdi. Yeryüzünün atmosferi temelde bütünüyle oksijensiz durumdan yüzde bir ila iki oranında oksijenli duruma geçti. Yüzeye yakın çevre dikkate alındığında bu oldukça büyük bir değişimdi fakat Dünya'nın okyanusları için, bu türden bir değişim önemsizdi.

Temel konu göreceli kütlelerdir. Okyanuslar, atmosfer külesinin 250 katından fazlasını içerir. Atmosfer kimyasındaki her türden küçük değişikliğin, hatta oksijendeki yüzde bir oranındaki artışın okyanuslara yansması oldukça uzun zaman (belki yaklaşık bir milyar yıl) alır.

Okyanusların tarihini anlamak isteyen jeokimyacılar, pek çok kimyasal elementi ve bunların izotoplarını mercek altına alır. 2,4 milyar yıl öncesinin de öncesinde, okyanuslarda bol miktarda çözülmüş demir bulunuyordu; bu ancak su kolonu, oksitleyicilerden (demir oksitlerin yoğunlaşmasına yol açacak biçimde) bütünüyle bağımsız olduğunda ve (hızla pirit ve diğer demir sülfür minerallerinin oluşumuyla sonuçlanacak biçimde) az miktarda sülfür içerdiğinde sağlanabilecek bir durumdu. Büyük Oksitlenme Olayı'nın atmosferde yarattığı değişikliklerle birlikte, bu demirin bir bölümü sığ suda demir oksitler olarak, ya doğrudan oksijenle ya da dolaylı olarak topraktan oksitlenmeyle aşınan ürünlerle reaksiyon yoluyla ortadan kaldırıldı. Atmosferdeki oksijen aynı zamanda okyanuslara akan ve daha fazla demir tüketen sülfürlü minerallerin hızla aşınmasına ve erozyonuna da yol açtı. Bu kimyasal değişiklikler damarlı demir oluşumlarının (bugün dünyanın demir cevheri rezervlerinin büyük bölümünü oluşturan tabakalarca renkli demir mineralinin bulunduğu kalın okyanus zemini tortularının) geniş çaptaki tortulaşmasını tetikledi. Damarlı demir oluşum süreci kademeliydi ve okyanuslarda bol miktarda demir bulunuyordu, dolayısıyla damarlı demir tortulaşması altı yüz milyon yıl daha sürdü. Sıkıcı milyar döneminde, okyanuslar hâlâ oksijensizdi fakat çözülmüş demirlerinin büyük bölümünü kaybetmişlerdi.

Bir milyar yıl daha ileriye gidin: Fotosentetik su yosunları oksijen üretmeyi sürdürdü ve oksijen, okyanusları kaplamaya başladı;

altı yüz milyon yıl öncesine gelindiğinde, Dünya'daki okyanusların büyük bölümünde, yüzeyden dibe kadar bol miktarda oksijen bulunuyordu. Arada olan, ara okyanus olarak bilinen şey ise sıkıcı milyarın düğüm noktasıdır.

1998 yılında, Güney Danimarka Üniversitesi'nden jeolog Donald Canfield, yeryüzünün ara okyanusunda, oksijen değil sülfürün başat rol oynadığını öne sürdü. (Bugün pek çok bilim insanı, sülfürün baskın olduğu Mezoproterozoik okyanusu Canfield Okyanusu diye adlandırmaktadır.) Canfield'in "A New Model for Proterozoic Ocean Chemistry" (Proterozoik Okyanus Kimyası için Yeni Bir Model) başlıklı tezi *Nature* dergisinin 3 Aralık sayısında yer aldı ve çok geçmeden pek çoğumuzun derin zaman içinde okyanus hakkında düşünüş şeklimizi değiştirdi.

Temel fikir basittir. Büyük Oksitlenme Olayı, demir dâhil pek çok "redoksa duyarlı" elementin dağılımını etkileyecek yeterlikte oksijen üretmiştir fakat okyanuslara oksijen verilmesi için yeterli olmanın yakınından bile geçmez. Öte yandan, toprağın artan aşınma ve oksitlenmesi sonucu okyanuslarda bol miktarda sülfat oluşmuştur. Dolayısıyla ara okyanusta oksijen ve demir az miktarda bulunurken sülfür yoğunlaşmıştır, bu bir milyar yıl boyunca süren kalıcı bir durumdur.

Direnç

Fosil kalıntıları, oldukça yavaş biçimde değişen bir ara okyanus görüşünü güçlendirir. 2 ila 1 milyar yıl öncesi arasında oluşan bazı kayalarda beklenmedik nitelikte mikroskobik fosiller bulunur. Kuzey Amerika'nın 1,9 milyar yıllık Gunflint çörtü, Çin'in kuzeyinin 1,4 milyar yılla 1,5 milyar yıl arasındaki Gaoyuzhuang oluşumu ve Rusya'daki Ural Dağları'ndan 1,2 milyar yıllık Avzyan oluşumu oldukça keskin ve net fosil mikropları içerir; bazıları özel bölünme eylemi gösterirler, öyle ki tıpkı canlı modern benzerleri gibi görünürler. Ancak bazı fosillerin niteliğinde bu türden çarpıcı bir gelişme yalnızca daha az değişen tarihlerini yansıtır, Dünya tarihinin bu dönemine ilişkin özünde yeni olan herhangi bir şeyi değil.

Uzun süreli oksijensiz, sülfürlü ara okyanusun varlığı, yaşam için hem iyi hem de kötü haberd. İyi tarafı, sülfür akışının bazı mikroplar için kusursuz bir enerji kaynağı sağlıyor oluşuydu- varlıklarını sülfatı sülfüre indirerek sürdürüyorlardı. Özel moleküler biyogöstergelerin, sülfür izotop verilerinin, hatta çört içinde iyi korunan bazı mikropların da aralarında olduğu, fosil kalıntılarından ipuçları, bütün olarak yeşil ve mor sülfür bakterilerinin Mezoproterozoik kıyı popülasyonunun artışına işaret eder. Bugün bazı oksijensiz ortamlarda varlıklarını sürdüren bu sülfürle beslenen mikroplar, gerçekten berbat (tıkali lağım kanalları gibi) kokan organik sülfür bileşimleri üretir.

Linda Kah, Roger Buick'in "en sıkıcı dönem" yorumuna "Mezopretorezoik dönem yeryüzünün en kötü koktuğı dönemdi" hiciyle katılıyor.

"Ne zaman kokuyordu?" diye soruyorum.

"Sanırım her zaman kokuyordu," diye cevap veriyor.

Yaşam için kötü haber nitrojene olan bağımlılığıydı. Nitrojen gazı (N_2) bol miktardadır ve bugünün atmosferinin yüzde seksenini oluşturur. Sorun yaşamın biyokimyasının nitrojen gazını kullanmıyor oluşudur; yaşam bunun yerine nitrojene, amonyak (NH_3) denilen indirgenmiş biçimiyle gereksinim duyar. Sonuç olarak, yaşam nitrojeni amonyağa dönüştüren akıllı bir protein, nitrojenaz denilen bir enzim geliştirmiştir. Fakat Arial Anbar ve Andy Knoll'un 2002 yılına ait, *Science* dergisinde yayınlanan parlak bir makalesinde vurgulandığı gibi, bu işte bir bit yeniğı vardır. Nitrojenaz enzimi sülfürle birlikte metal (ya demir ya da molibden) içeren bir atomlar kümesine dayanır fakat iki metal de ara okyanusta bulunmuyordu. Demir, damarlı demir oluşumları sırasında yok edilmişti, dolayısıyla bu bir seçenek değildi. Öte yandan molibden, yalnızca oksijen-yoğun suda çözülebilir, tıpkı bugünün okyanuslarında olduğu gibi. Oksijensiz ara okyanus döneminde molibden yalnızca görece sığ sularda aşınan kıyıların yakınlarında (bu sülfür bakterilerinin geliştiğı düşünölen çevrelerde) bulunuyordu.

Böylelikle Canfield'ın çığır açıcı yazısını Mezoproterozoik geometriyle paleontolojiyi (uygulayıcıları yirmi yıl önce her zaman birbirleriyle iletişimde olmayan iki disiplini) ilişkilendiren bir dizi yayın izledi. Sonuç: Ara okyanus mikrobik yaşam barındırıyordu fakat bu türden bir yaşam yalnızca sahil yakınlarında gelişebirdi. Sülfür azaltan bakteriler okyanus üreten su yosunlarıyla bir aradaydı. Yaşam bir milyar yıl boyunca sürdü fakat birkaç biyolojik yenilik vardı.

Mineral Patlaması

Mineraloji, uzun süredir Dünya'nın büyük öyküsünden tuhaf biçimde bağımsız olarak düşünülen (jeokimya ve paleontolojiden bu alanların birbirinden uzaklığı kadar uzak) bir başka alan olarak devreye girer. Bu açıklanamayacak bir ikilemdir, çünkü Dünya'nın uzak geçmişine ilişkin bildiğimiz her şey, minerallerde gizli kanıtlardan gelir. Ancak mineralogların büyük bölümü nadiren örneklerinin yaşından ya da evriminden söz eder. Mineralojik araştırmalar, iki yüzyıldan uzun süredir daha çok, örneklerin statik fiziksel ve kimyasal özelliklerine odaklanmıştır. Sertlik ve renk, kimyasal elementler ve izotoplar, kristal yapı ve dış form üzerine yapılan araştırmalar yaşamımın kaynağına hâkim oldu.

Bir zamanlar ben de bu iki yüz yıllık geleneğe bağlıydım. Araştırma kariyerimin ilk yirmi yılı boyunca, kaya oluşturan sıradan minerallerin kusursuz küçük kristallerini ayırdım, onları iki parlak kesimli hücre tabanlı elmaslar arasında hayal edilemeyecek basınçlarla sıktım, sıkıştırılmış örnekleri X ışınlarına maruz bıraktım ve atomik düzenlemelerde ince farklılıklar ölçtüm. Meslektaşlarım ve ben jeolojik zaman ve mekânı göz ardı ettik çünkü mikroskobik örneklerimizin yaşı ya da yeriyle çok az ilgileniyorduk. Kendimizi mineral fizikçiler diye adlandırdık ve tarihsel olmayan kimya ve fizik bilimleriyle bütünleştik. Salt jeolojik “öykü anlatımı”na karşı alttan alta bir ön yargı mı benimsemiştik?

Bu zihniyet, mineralojinin, madencilik ve kimya alanlarındaki kökenlerini yansıtır ve muhtemelen fizik ve kimya alanlarının

jeologların yaratıcı, niteliksel masallarından daha incelikli olduğu yönündeki bir bilinçaltı inancıyla renklendirilir. (Jeologlar sıklıkla bu ikilemin fizik ve kimya alanında Nobel Ödülü'nün bulunup jeoloji alanında bulunmayışının nedeniyle ilgili olup olmadığını merak eder.) Sonuç olarak pek az sayıda mineralog, zaman içinde Dünya'nın yüzeye yakın mineralojisinde görülen hayret verici değişiklikler hakkında düşünmüştür.

2008 yılında, "Mineral Evrim" başlıklı makalemizi yayınlamak üzere yedi meslektaşımın bir araya geldiğimizde, hedefimiz büyük oranda bu geleneksel bakış açısını değiştirmek; mineralojiyi tarihsel bir bilim olarak yeniden çerçevelemektir. Dünya'nın, yanı sıra Güneş Sistemi'mizdeki ve onun ötesindeki diğer gezegenlerin mineralojik tarihini inceleme girişimimiz, Dünya mineralojisinin, her birinde minerallerin çeşitliliği ve dağılımında değişikliklerin görüldüğü bir dizi evrede geliştiğini ortaya koyar. Bu kitabın, gezegenlerin mineralojik basitlikten karmaşıklığa, Güneş Sistemi'mizi oluşturan toz ve gazların içindeki yaklaşık bir düzine minerale bugün Dünya'da bilinen (üçte ikisi cansız bir dünyada var olamayacak) dört bin beş yüzden fazla mineral türüne evrildiği anlatısal gelişimi de bu şekilde oluşur.

Bu, sıklıkla yalnızca esaslı profesyonellerin okuduğu, söz konusu alana hitap eden *American Mineralogist* dergisinde yayınlanan oldukça teknik bir makaleydi. Fakat uluslararası medya, yaşam ve minerallerin bir arada geliştiği önermesini hızla kaptı. *The Economist* ve *Der Spiegel*, *Science*, *Nature* ve birkaç popüler bilim dergisi gezegenin değişen mineral çeşitliliğine ilişkin akılcı tahminlerimizi değerlendirdiler. Hatta *The New Scientist* mineral evrimin yüzgeçleri olan yüzen bir kristalden bastonu olan "gelişmiş" bir kristale dört "evresini" gösteren zekice bir karikatür yayınladı. Hiçbirinin kabul etmediği, bu kışkırtıcı tahminlerin tümünün kurgusal olduğuydu. Mars gerçekten de beş yüz mineral türüyle mi sınırlıdır? Cansız dünyalar gerçekten de bin beş yüz türü aşmaya meyilli değil midir? Dünya'nın mineralojik çeşitliliğini üç katına çıkarmak için canlı, oksijenli bir dünyaya ihtiyaç

olduğu doğru mudur? Bu beyanları hipotezler olarak sunmuştuk; bunları test etme macerasının başlaması gerekiyordu.

Bakılacak en verimli yerin sıkıcı milyar kayaları olacağını kim tahmin edebilirdi?

Mineral evrim hipotezini niteliksel açıdan detaylandırmak için tekil mineral grupları incelenmelidir. Şanslıyız ki dünyada pek çok farklı mineral grubunda uzman insanlar bulunmaktadır. Bu yüzden Maine Üniversitesi'nde jeoloji alanında araştırmacı profesör olan Ed Grew'le iletişime geçtim. Ed yaşamını berilyum ve bor (ara sıra büyük, güzel kristallerin içinde yoğunlaşan nadir bulunan elementler) içeren minerallerin incelikli çalışmasına adanmış azimli, yoğun çalışan bir bilim insanı. Resmi olarak onaylanmış 108 berilyum mineralini eski arkadaşları gibi tanıyor. Her birinin bir karakteri var; her biri jeolojik bir rol oynuyor. Ben de ondan zaman içindeki öyküleri hakkında düşünmesini istedim. İlk kez ne zaman ortaya çıkmışlardı? Çeşitlenmeleriyle sonuçlanan süreç nasıl bir süreçti? “Yok olan” herhangi bir berilyum minerali var mıydı? Daha önce hiç kimse bu tür soruları cevaplamaya çalışmamıştı. Verili bir elementin her mineralini listelemek yeterince zordur fakat her türün ne zaman ortaya çıktığını ya da ortadan kaybolduğunu açıklığa kavuşturmak çok büyük bir görevdir. En sık görülen berilyum minerali (en değerli olanı, koyu yeşil çeşidi zümrüttür) beril için, binlerce yer vardır. En eski berilin izini sürmek göz korkutucu bir güçlüktür.

Bir yıllık bir çalışmadan sonra, Ed Grew, raporlanan binlerce olay temelinde, berilyum minerallerinin zaman içindeki kümülatif sayısını gösteren bir işaret grafiği ortaya çıkardı. Beklendiği gibi, ilk berilin ortaya çıkması oldukça uzun bir zaman (yaklaşık 1,5 milyar yıl) almıştı. Berilyum elementi yer kabuğunda yalnızca milyonda iki birimde bulunur, dolayısıyla sıcak sıvıların o eser miktardaki berilyumu seçmesi ve beril kristallerini yoğunlaştırabilen zengin bir sıvıda yoğunlaştırması zaman alır. Bir milyar yıl kadar daha, yalnızca yaklaşık yirmi farklı türde berilyum minerali

ortaya çıkmıştır. Yeni kuramımız doğrultusunda, 2,4 ila 2 milyar yıl arası öncesinde, Büyük Oksitlenme Olayı sırasında büyük bir yeni mineraller titreşimi gerçekleşmiş olmalıydı, fakat Ed'in ortaya çıkardığı bu değildi. Buna karşılık büyük artış kısa bir süre sonra gerçekleşti ve yaklaşık olarak 1,7 milyar ila 1,8 milyar arası dönemdeki bilinen türlerin sayısını iki katından da fazlasına çıkardı. Sıkıcı milyarın hemen başlarındaki bu zaman dilimi Kolombiya süper kıtası için bir birleşme dönemi idi. Belki de berilyum, kıta çarpışmalarıyla ilişkilendirilen yoğun dağ oluşumu olayları sırasında yeni minerallerde yoğunlaşmıştı.

Ed Grew, sonraki aşamada, bilinen 263 bor mineralinin daha da etkileyici bir araştırmasını yaptı. En çok muhteşem ikinci derecede değerli kırmızı-yeşil değişkeni dolayısıyla değer verilen turmalin, Dünya'nın en eski kayalarından bazılarının içinde bulunur fakat bu yaklaşık yarım milyar yıl boyunca böyleydi. 2,5 milyar yıl öncesine ait örneklerde, yaklaşık yirmi değersiz bor türü (modern toplamın yüzde onundan daha azı) tespit edilmiştir. Berilyum mineralleri için söz konusu olduğu gibi, Ed sıkıcı milyar döneminin kayalarındaki bor türlerinin sayısının, bu kez yaklaşık 2,1 milyar ila 1,7 milyar yıl öncesi arası (Kolombiya süper kıtasının oluşumunu parantez içine alan bir ara dönemde) ikiye katlandığını gözlemledi. Mineral çeşitliliğindeki bu hızlı artış da pek çok soruyu gündeme getirir; oksitlenme sonrası çeşitlenmesinin gerçekte ne zaman oluştuğuna, süper kıtaların birleşmesine ve sıkıcı milyar sırasında mineralojik yeniliğin yükselişine ilişkin sorular.

Mineral evrimine bir sonraki girişimimiz için nadir bulunan cıva elementinin bilinen doksan mineralini ele aldık; bu resmi daha da karmaşık hâle getiren bir çalışmaydı. Çok daha yoğun miktarda bulunan demir elementi gibi, cıva da üç kimyasal durumda; elektron-yoğun bir element (eski termometrelerin bilindik gümüşsü sıvısı) olarak, yanı sıra iki farklı oksitlenmiş biçimde oluşabilir. Dolayısıyla Büyük Oksitlenme Olayı'ndan sonra, cıvanın mineral çeşitliliğinde keskin bir artış olmasını bekledik fakat ortaya çıkan resim oldukça farklıydı. Berilyum ve bor minerallerinin tarihi için geçerli olduğu gibi, ilk cıva mineralinin (en sık görülen

madeni olan parlak kırmızı minerali zinoberin) ortaya çıkması bir milyar yıldan uzun sürdü. Yeni türler titreşimlerle ortaya çıktı: Kenorland'ın oluşumu sırasında bir düzine yeni mineral, yarım milyar yıldan uzun süreli bir durağanlık dönemi, Kolombiya'nın oluşumu sırasında yarım düzine tür daha. Gözle görülür biçimde, kıtalar çarpıştıkça, ortaya çıkan dağ oluşturan olaylar bir mineralleşen sıvı akınına (yeni mineraller oluşturan süreçleri) açığa çıkarmaktadır. Ancak bu tür bir mineralleşmenin süper kıta oluşumunun ara dönemleriyle sınırlı olduğunun keşfi büyük bir sürprizdi.

Sonra daha da büyük bir sürpriz yaşandı: 1,8 milyar yıl önce-siyle 600 milyon yıl öncesi arasındaki epik ara dönemde (sıkıcı milyarın süresini de aşan bir boşluk döneminde) hiçbir şey olmadı. Bir milyar yıl önce, Rodinia'nın olduğu dönemde bile yeni bir cıva minerali ortaya çıkmadı. Bugün suçlanması gerekenin sülfür dolu ara okyanus olmasından kuşkuluyoruz. Cıva sülfürü zinober, tüm madenler arasında en az çözünür olandır. Antik sülfür denizlerinde yıkanan her türden cıva atomu hemen sülfürle tepkimeye girerek mikroskopla görülemeyecek kadar küçük zinober parçaları oluşturuyor, yavaş yavaş dibe çöküyor ve cıva mineralleşmesini daha fazla engelliyordu. Ancak son 600 milyon içinde, okyanuslarda oksijen yoğunlaştıkça ve topraklar yaşama büründükçe cıva minerallerinin popülasyonunda patlama oldu.

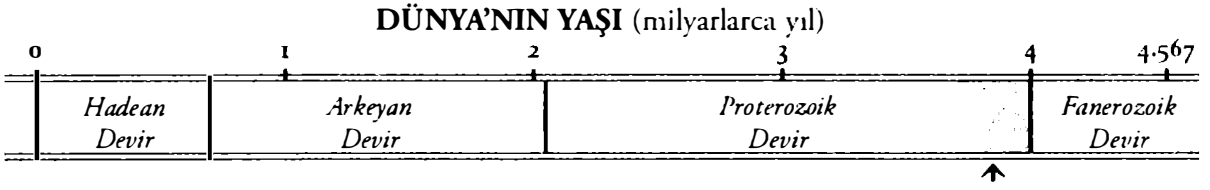
Gizemler

O halde, yeni minerallerdeki patlama, sıkıcı milyarın olgu göstergelerinden biri olan süper kıta döngüsünün bir sonucu muydu? Ya da basitçe oksijenin artışına karşı ertelenen bir tepki miydi? Peki ya cıva elementi: Sülfür-yoğun oksijen hikâyesinin tamamını mı oluşturuyor? Mineral oluşturan yaklaşık elli element üzerinde yapılan çalışmalar ne türden yeni ve beklenmedik sonuçlar ortaya çıkaracak? Açık olan öğrenilecek başka çok fazla şey olduğudur, çünkü o bir milyar yıllık ara dönemin yoğun belirsizlikleri dikkatimizi oldukça yakın bir zamanda çekmiştir.

1,85 milyar yılla 850 milyon yıl arası öncesine dayanan bu yetersiz oranda belgelendirilmiş ara dönem, gezegenimizin evriminin her aşamasını karakterize eden amansız değişim sürecini paylaşır. 850 milyon yıl öncesinde, Dünya'nın yüzeye yakın çevresi, geri dönüşü olamayacak biçimde değişmişti. Oksijen oranı gittikçe artan okyanus kıyıları su yosunları ve kötü kokulu sülfür bakterisinin de aralarında olduğu diğer mikroorganizmalarla doluydu, öte yandan topraklar yeni yaşam patlamasına hazırdı.

Gizemli, çok da sıkıcı olmayan milyar, bize hiçbir şey öğretmese de Dünya'nın durağanlık dönemine girme, çatışan pek çok gücünün iyicil bir dengesini oluşturma potansiyeline sahip olduğunu öğretir. Yerçekimi ve ısı akışı, sülfür ve oksijen, su ve yaşam, yüzlerce milyon yıl boyunca sabit bir dengeyi bulup koruyabilir. Fakat her zaman bir *ama* vardır. Bu güçlerden herhangi birini tetiklediğinizde, Dünya dengesini yitirebilir ve öngörülmesi güç sonuçların (yüzeye yakın çevreyi birkaç yıl içinde bozabilecek hızlı değişikliklerin) olduğu bir taşma noktasına erişebilir.

Bir sonraki aşamada olan da buydu.



Dokuzuncu Bölüm

Beyaz Dünya

Kartopu-Sera Döngüsü

Dünya'nın Yaşı: 3,7 ila 4 milyar yıl arası

Dünya tarihinin yaklaşık yarısını oluşturan 2,5 milyar ile 542 milyon yıl öncesi arasındaki Proterozoik Devir keskin ayrımların olduğu uzun bir dönemdi. Önemli sayılabilecek yaklaşık ilk 500 milyon yıllık döneminde, fotosentetik su yosunlarının gelişimine ve bunun sonucunda atmosferdeki oksijenin artışına, bir zamanlar demirin yoğun olduğu okyanusların kitlesel damarlı demir oluşumlarının tortulaşmasıyla dönüşümüne ve DNA'ları bir çekirdekte (tüm bitki ve hayvanların öncüleri olan hücrelerde) ayrı tutulan ökaryot hücrelerinin biyolojik yeniliğine tanıklık etti.

Proterozoik Devir'in ortasındaki bir milyar yıl (sıkıcı milyar denilen dönem) aynı zamanda oldukça pis kokulu olan çok daha ağır, sürekli değişen bir süreçti.

Buna karşılık, son üç yüz milyon yıl, kıtasal ayrılma ve birleşmeler, radikal iklim değişiklikleri, okyanus ve atmosfer kimyasındaki epik kaymalar ve hayvan yaşamının yükselişiyle muhtemelen en dinamik dönem oldu.

Umarım Dünya sistemlerinin karmaşık biçimde ilişkili olduğunu ifade edebilmişimdir. Hava, su ve toprak bize oldukça farklı zaman dilimlerinde değişen birbirinden ayrı alanlar olarak görünür.

Hava durumu gün içinde değişiklik gösterir; okyanuslar bin yıllık dönemlerde değişir; kayalar milyonlarca yıl içinde dönüşüm geçirir; süper kıtaların birleşip ayrılması yüzlerce milyon yıl alır. Bununla beraber her dünya sistemi tüm diğer dünya sistemlerini hem gözle görülür hem de gizli biçimlerde etkiler.

Bir ev, ana gezegenimiz için yeterli olmamakla birlikte işlevsel bir metafor işlevi görür. Bir ev almayı düşündüğünüzde pek çok şeyi bilmek istersiniz; örneğin ne zaman inşa edildiğini, pek çok ek ve onarımın zamanını ve geometrisini. Temelden tavana kadar evinizin yapı gereçlerine ve donanımına ilişkin ayrıntılar istersiniz. Boru tesisatı ve su kaynağı yanı sıra hava işleme sistemine (kalorifer, klima ve bunların enerji kaynaklarına) ilişkin bir şeyler öğrenmeniz gerekir. Zeki bir ev müşterisi aynı zamanda potansiyel riskler hakkında da sorular sorar: Yangın ve karbon monoksit, akkırıncalar ve marangoz karıncalar, radon ve asbest, sızıntılar ve yapıyla ilgili. Jeologlar benzer şekilde Dünya'nın kökenleri ve büyük dönüşümler, kayaların ve minerallerin doğası, su ve havanın hareketi, enerji kaynakları ve jeolojik tehlikelerin taşıdığı riskler üzerinde çalışır.

Farklı sistemler, bazen şaşırtıcı ve beklenmedik biçimlerde olumsuz ve olumlu geri bildirim döngüleriyle ilişkili olduğundan, bir ev aynı zamanda Dünya'nın karmaşık davranışlarını da taklit eder. Soğuk bir kış gününde, evinizin içindeki sıcaklık rahatlık düzeyinizin altına düştüğünde, termostat kaloriferi açarak tepki verir ve ısı artar. Ev ısındığında kalorifer de kapanır. Sıcak yaz günlerinde, klima içerideki ısı çok fazla yükseldiğinde tepki vererek bu cevabı yansıtır. Dünya da yüzeyinde ve yüzeye yakın bölgelerinde az çok tutarlı ısı, nem ve oluşum koşullarını korumasına yardımcı olan pek çok benzer olumsuz geri bildirim döngüsüyle işler. Dolayısıyla örneğin, okyanusların ısınması Güneş ışığını uzaya geri yansıtan ve okyanusları soğutan daha fazla bulut oluşumuyla sonuçlanır. Benzer şekilde, atmosferdeki karbondioksit yoğunluklarının artışı küresel ısınmaya neden olur ve bu da kaya aşınmasını (nihayetinde fazla karbondioksiti tüketen ve soğumayla sonuçlanan bir süreci) hızlandırır.

Evler aynı zamanda dönem dönem, bazen kötü sonuçları olan güçlendirici ya da “olumlu” geri bildirimler sağlar. Isıtma sisteminiz soğuk bir kış gününde arızalanacak olursa borular donup patlayabilir, soğuk suyun evinizi doldurmasına neden olabilir ve evinizi daha da soğuk ve daha az yaşanılabilir bir yer hâline getirebilir. Dünya’nın bugünkü değişen iklimine ilişkin belirsizliklerin pek çoğu potansiyel olarak olumlu geri bildirim döngülerine ve bunların taşma noktalarına odaklanır. Yükselen deniz seviyeleri kıtasal sellere yol açacak, bu daha fazla buharlaşma ve yağışla sonuçlanabilecek ve bunun sonucunda daha fazla kıtasal sel olacaktır. Isınan bir okyanus metan-yoğun buzun okyanus zemininde ve bu zeminin üstünde geniş çapta erimesine neden olabilir, bu sera gazı metanı atmosfere salabilir ve bu da daha da fazla metan salınımıyla sonuçlanabilecek biçimde daha da fazla ısınmaya yol açabilir. Kontrol edilmeyen olumlu geri bildirimlerin olası yıkıcı etkilerini görmek için yalnızca kalın karbondioksit atmosferi ve 480 derecelik yüzey ısısıyla kardeş gezegenimiz Venüs’ün kontrolsüz sera etkisine bakmamız gerekir.

Sıkıcı milyar, gerçekten de sıkıcı olduğu ölçüde, kontrollü bir değişim içeren pek çok etkin olumsuz geri bildirimin bir sonucuydu. Kara parçalarının yerküre çapındaki hareketlerine ve bu uzun süreli ara dönem boyunca süper kıtaların tekrarlanan birleşme ve ayrılmalarına karşın, Dünya’nın iklimi oldukça istikrarlı bir hâle gelmiş gibi görünür. Hiç buzul çağı olmadı. Oksijensiz, sülfür-yoğun okyanusun kimyası çok fazla değişmedi; yaşam da çarpıcı herhangi bir biçimde gelişmedi. Dolayısıyla yeni mineral çeşitleri ortaya çıktı fakat hiçbir büyük taşma noktası havayı, toprağı ya da denizi değiştirmede.

Bunların tümü Rodinia’nın kopuşuyla birlikte değişmek üzereydi.

Kopuş

Dünya’nın 1,85 milyar ila 850 milyon yıl öncesi arasındaki anlaşılmaz sessiz ara dönemle keskin bir zıtlık oluşturacak biçimde, bunu izleyen birkaç yüz milyon yılda, gezegenimizin tarihindeki

en bariz biçimde hızlı ve uç noktada yüzeye yakın dalgalanmalarından bazıları deneyimlendi. Yaklaşık 850 milyon yıl kadar önce, Dünya'daki pek çok kıtasal kütlelerin çoğu, hâlâ Ekvator'un yakınında kuru ve yaşamdan oldukça yoksun Rodinia süper kıtasında kümelenmiş olarak duruyordu. Muhtemelen yalnızca birkaç yalıtılmış volkanik ada kavisiyle kesintiye uğrayan geniş Mirovia okyanusu, bu çıplak, paslı kırmızı mega kıtayı çevreliyordu. Yaşama elverişli olmayan atmosfer, bugünün oksijen miktarının yalnızca küçük bir bölümünü içeriyordu, bu ultraviyole koruyucu bir ozon katmanının büyük bir bölümünü oluşturmak için çok küçük bir orandı. Güvenilir bir oksijen stoku ve güneş kremi olan bir zaman yolcusu, yavan su yosunlarıyla beslenerek kıyıda varlığını sürdürebilirdi fakat bu, ıssız Neoproterozoik Dünya'nın yaşam koşullarında piknik yapmaya pek benzemezdi.

Rodinia'nın dengesiz kara ve deniz dizilimi başarısızlığa mahkûmdu. Dünya tarihinin büyük bölümünde, iklim olumsuz geri bildirimlerle ılıman hâle gelmişti. Elbette Dünya tarihi boyunca iklim farklılaşmış fakat bu dalgalanmalar nadiren yaşamı tehdit eden uç noktalara erişmişti. Ancak yaklaşık 850 milyon yıl öncesinden itibaren, çeşitli değişiklikler geçmişteki dengeyi bozdu ve Dünya'yı iklimsel bir taşma noktasına itti. En önemlisi Ekvator bölgesindeki Rodinia'nın kademeli bölünüşüydü. 850 milyon yıl önceki ilk bölünme sadeydi; bu dönemde, bugün Afrika'nın güneyinin parçalarını oluşturan Kongo ve Kalahari kratonları, normal koşullarda bütünlüklü olan süper kıtanın güneybatısı yönünde ayrılmaya başlamıştı. Yaklaşık 800 milyon yıl kadar önce, ikinci bir küçük çöküntü kuşağı, ana karadan güneye doğru hareket eden Batı Afrika kratonunu ayırdı. 750 milyon yıl kadar önce, geniş volkan zincirlerinin ve bazaltik lav akıntılarının kabukta büyük çatlakları açığa çıkardığı bir dönemde, Rodinia'nın bölünmesi en yoğun dönemindeydi. Büyük bir kuzey-güney çöküntü kuşağı Ur'u batıya ve Laurentia, Baltık, Amazon ve diğer küçük kratonları doğuya doğru bölerken süper kıta ikiye bölündü.

Ayrılmayla birlikte, binlerce kilometrelik yeni kıyı şeritleri ve bununla ilişkili hızlı kıyı erozyonu darbeleri oluştu. Dinamik tortu-

havzalar, kratonlar arasındaki denizlerde oluştu ve Dünya'nın kaya tarihindeki uzun durağanlık dönemine (Mezoproterozoik Dönem'de başlayan ve yaklaşık olarak bir milyar yılın çeyreği kadar bir süre boyunca süren o tortul kaya birikimine) gerçek anlamda bir son verdi. Mikrobik yaşam bu değişen, parçalara ayrılan dünyada gelişti. Aşınmış topraklar uzun süredir okyanusun yetersiz fosfat, molibden, manganez ve diğer önemli elementleriyle sınırlandırılmış olan fotosentetik su yosunlarına mineral besinlerle katkı sağladı. Paleontologlar kalın balçıklı yeşil telcik matlarının ve pis kokulu su yosunu yığınlarıyla dolu açık suların olduğu, sığ, kumlu gelgit kuşaklarından oluşan bir dönem hayal eder.

Tektonik olaylar Dünya'nın okyanuslarını, atmosferini ve iklimini değiştirecek biçimde daha da fazla bir araya gelmiştir. Atmosferdeki oksijen kısmen kıyılarda su yosunlarının haylazca çıkmasından ötürü, fakat aynı zamanda su yosunu biyokütlesinin artan üretimi, organik karbonunun hızla gömülmesiyle sonuçlandığı için yükselmiştir. Dünya tarihi boyunca, karbon-yoğun biyokütle oksijenin başat tüketicilerinden biri olmuştur. Çürüyen biyokütle oranına paralel olarak, oksijen de daha hızlı biçimde tüketilmiştir. (Orman yangınları bu süregelen oksijen tüketen olgunun çok hızlı bir şekilde kabul edilmesini temsil eder.) Aynı şekilde, karbon-yoğun biyokütle ne kadar hızlı gömülürse, oksijen seviyesi de o kadar hızlı yükselir. Fakat biyokütlenin gömülüp gömülmediğini nasıl bilebiliriz? Sığ okyanus zeminindeki karbon-yoğun mineral katmanlarını çökelten kireç taşı, hemen göze çarpmayan farklı bir geçmişe sahip gibi görünür.

Kireç taşındaki karbon izotopları, su yosunlarının üretim oranında değişikliklere işaret eder. Yaşamın temel kimyasal reaksiyonları (örneğin su ve karbondioksitin fotosentez sürecinde şekere dönüşmesi) her zaman karbon-13'e göre daha hafif oranda karbon-12'yi yoğunlaştırır. Sonuç olarak biyokütle içindeki karbon (yani ölü ya da canlı su yosunu) kireç taşındaki organik olmayan karbonla karşılaştırıldığında her zaman "izotopik açıdan hafif"tir.

Mikrobik yaşamın geliştiği ve hafif karbonun okyanuslarda tüketildiği normal dönemlerde, kireç taşı buna paralel olarak yoğun

bir izotopik etki gösterir. Sıra dışı ölçüde hızlı biyokütle gömülme-
lerinin gerçekleştiği, daha hafif karbon izotopların daha da fazla-
sının sistematik olarak okyanuslardan çıkarıldığı dönemlerde de
kireç taşı oluşturarak artan karbon, ortalamada daha da ağırdır.
Elbette, 790 ila 740 milyon arası öncesinde Rodinia kıyılarında bi-
riken kireç taşı sıra dışı ölçüde ağırdır. Bu ara dönemde, su yosun-
ları yayılmış ve beklenmedik oranda gömülmüş olmalıdır.

Yaşamın bu savurganca çiçeklenişinin Dünya'nın iklimi üze-
rinde gözle görülür bir etkisi olmuş olabilir. Mikrobik yaşam, vol-
kanlarla sürekli atmosfere pompalanan sera gazı karbondioksi-
tini tüketir. Normal zamanlarda, CO₂ girdi ve çıktıları dengelenir,
dolayısıyla atmosfer yoğunlaşmaları görece değişmez olarak ka-
lır fakat su yosunlarının hızla büyüdüğü Neoproterozoik dönem-
lerde, karbondioksit seviyeleri düşmüş, dolayısıyla sera ısınma-
sını azaltmış olabilir.

CO₂ ile ilişkili bir diğer karmaşık geri bildirim döngüsü de Dün-
ya'nın soğumasını arttırmış olabilir. Rodinia'nın ayrılması, binlerce
kilometrelik yeni deniz dibi volkanlarının oluşumuyla sonuçlan-
mış, bu da sıcak, daha az yoğun bir okyanus kabuğu ortaya çıkar-
mıştır. Bu türden sıcak, batmayan bir kabuk öncesinden daha sığ
okyanusları destekleme eğiliminde olmuş, böylelikle ortalama de-
niz seviyeleri yükselmiştir. Dolayısıyla bundan 750 milyon yıl ön-
cesinden sonraki dönem, muhtemelen pek çok iç denizin olduğu
dönemlerden biriydi. İç denizler daha fazla buharlaşma ve artan
yağış demektir ve bu da korunmasız kayaların daha hızlı biçimde
aşınmasıyla sonuçlanır. Fakat kaya aşınması sera gazı karbondi-
oksitini hızla tüketir ve bunun sonucunda daha düşük CO₂ sevi-
yeleri küresel soğumaya yol açabilir.

Rodinia'nın bölünmesinden önce ve bölünme sırasında, kıtala-
rın ve okyanusların özel konumları, küresel iklimin değişmesinde
ek bir rol oynamış olabilir. Okyanuslar ve karalar albedo (Güneş
ışığını yansıtma ya da sönümleme yetisi) açısından mutlak bir
karşıtlık içindedir. Daha karanlık okyanusların daha düşük albe-
doları vardır; Güneş enerjisinin büyük bölümünü soğurur ve bu
süreç içinde daha da ısınırlar. Öte yandan kuru çorak toprak çok

daha yansıtıcıdır. Rodinia gibi kurumuş, ıssız bir süper kıta fazla Güneş ışığının büyük bir bölümünü yeniden uzaya yansıtırdı. Kutup okyanuslarının ve Ekvator kıtalarının bu türden bir dizilimi her türlü küresel soğuma olayını arttırırdı, çünkü Ekvator kutuplardan çok daha fazla Güneş enerjisi alır.

Bu türden küresel çaptaki süreçlerin ve karmaşık geri bildirim döngülerinin ayrıntıları hâlâ çözümlenmektedir fakat Neoproterozoik Dünya'nın, uzun göreceli durağanlık döneminden sonra, büyük değişimler için dengelenmiş olduğu açıktır.

Kartopu Dünya - Sera Dünya

Bir milyar yılın dörtte biri kadar uzun bir dönem öncesinde, Dünya, o dönemden önce ya da o dönemden bu yana benzeri görülmemiş iklimsel bir istikrarsızlık dönemine girdi. Her şey zorlu bir buzul çağıyla başladı.

Buzullar geride tartışmasız tortul özellikler bırakır. Bunların en gelişmişleri tillit denilen, kaotik kum, çakıl ve açısal kaya parçaları ve ince kaya tozu içeren tanılayıcı, düzensiz kaya katmanlarıdır. Buzullar aynı zamanda arkalarında ağır ilerleyen buz tabakalarıyla çizilmiş ve cilalanmış olan yuvarlak ana kaya çıkıntıları da bırakır. Değişken büyük kayalar ve tümsek benzeri buzul taşları da kanıtlara katkı sağlar, tıpkı buzul göllerindeki mevsimsel akışı temsil eden ince katmanlı varvli tortular gibi.

Dünya çapında bu alanda çalışan jeologlar, baktıkları neredeyse her yerde, 740 ila 580 milyon yaşındaki kayalarda bu buzul özelliklerini keşfetmiştir. Gerçekten de jeolog Paul Hoffman ve Harvard ve Maryland üniversitelerindeki üç meslektaşı kısa, heyecan verici "A Neoproterozoic Snowball Earth" başlıklı yazılarını, *Science* dergisinin 28 Ağustos 1998 sayısında yayınladıklarında, yaklaşık 740 milyon yıl önceki ani ve şiddetli iklim değişikliğine ilişkin kanıtlar, onlarca yıldır birikiyordu. Hoffman ve meslektaşları, Dünya'nın o ara dönemde en az iki kez yalnızca bir buzul çağı deneyimlemeyip aynı zamanda kutuplardan Ekvator'a bütünüyle donduğu yönünde sıra dışı bir tespit yaptılar. İddialarını kısmen

Namibya'nın İskelet Sahili'ndeki bir dizi kayanın üzerinde yaptıkları incelikli alan gözlemi üzerine kurdular: Kutupların yaklaşık 12 derecelik bir enlemde Ekvator'a yakın olduğuna ilişkin paleomanyetik sinyallerle yan yana kalın buzul tillit tortuları. Bunlar yüksek dağlardaki alp buzulları da değildi; tillitler net biçimde deniz seviyesinde, sığ kıyı sularında tortulaşmıştı. Hava buna paralel olarak Ekvator yakınlarında buz gibi soğuk olmalıydı. Öte yandan, Dünya'nın en yakın dönemdeki buzul çağında, ilerleyen buzullar hiçbir zaman 45 derecelik enlemden daha güneye inmedi ve fosil kanıtları buzun en çok olduğu dönemde dahi görece ılık bir tropik bölgenin varlığına işaret ediyor. Harvard ekibinin deniz seviyesinde, Ekvator'a yakın Neoproterozoik buz birikintilerine ilişkin çürütülemez kanıtları vardı. Kartopu Dünya için de aynı şey geçerliydi.

1998 yılında, Hoffman'ın makalesini okuyan pek çok bilim insanı için, karbon izotoplar bu türden ani ve felaket getiren bir değişimin açık delilini sunuyordu. Varsayılan ilk kartopu Dünya çağından önceki milyonlarca yıl içinde (yaklaşık 740 milyon yıl önce) su yosunu biyokütlesinin hızlı büyümesi izotopik açıdan hafif karbonu yoğunlaştırmıştı. Buna paralel olarak, parçalanmış Rodinia süper kıtasının çevresindeki kıyı sularında tortulanan eş zamanlı kireç taşları ağırdır. Öte yandan, mikrobik üretkenlik yavaşlayacak ya da duracak olursa kireç taşında bulunan karbon izotopları ortalama çok daha hafif hâle gelmelidir. Hoffman ve meslektaşlarının bulmuş olduğu da tam olarak budur; yaklaşık yedi yüz milyon yıl önce buzul çökeltilerinin ortaya çıkışından hemen önce ve hemen sonra, ağır karbonda yüzde birden daha fazla oranda, büyük bir düşüş.

Ortaya çıkan model, her biri Dünya'yı daha da soğuk bir duruma getiren iç içe geçmiş olumlu geri bildirim döngülerine dayanır. Geri bildirimlerden biri kıtasal aşınmaya (havadan daha fazla karbondioksit çektikçe sıcak ve rutubetli tropik bölgelerde güçlenen bir sürece) dayanıyordu. Bir diğer geri bildirim, büyük fotosentetik su yosunu döngüleri, havadan daha da fazla CO₂ topladıkça devreye girdi. Bu arada, Dünya'nın atmosferindeki sera zayıfladıkça ve iklimi soğudukça, kutuplarda buz tabakaları oluşmaya

ve büyümeye başladı. Bu taze beyaz buz ve kar, uzaya daha fazla Güneş ışığı yansıtıyordu, bu Dünya'yı geçmişte olduğundan daha hızlı biçimde soğutan olumlu bir geri bildirimdi. Buz tabakaları gittikçe daha alçak enlemlere yayıldıkça da hâlâ ılık olan Ekvator kıtası ve verimli su yosunu ekosistemi gökyüzünden gittikçe daha fazla CO₂ çekmeyi sürdürdü. Dünya'nın geçici olarak dengesi bozulan iklimi, her iki kutuptaki beyaz buzullar Ekvator'a eriştikçe ve nihayetinde yerküreyi çevreledikçe bir taşma noktasına erişti. Bu senaryonun, Paul Hoffman ve meslektaşlarının desteklediği uç noktadaki "katı kartopu" versiyonunda, 1,6 kilometreye ulaşan bir buz mantosu yerküreyi kaplarken Dünya'nın ortalama ısısı -45 dereceye kadar düşüyordu.

Dünya milyonlarca yıl boyunca buz (ya da en azından sulu kar) içine hapsedilmişti. Beyaz "kartopu" Dünya, Güneş ışınlarını çekme yetisinden yoksun biçimde, sonsuza dek buzlu kozasında kapalı kalacak gibi görünüyordu, çünkü sıcaklıklar hiçbir zaman donma noktasının üzerine çıkmıyordu. Küresel buzul çağı, neredeyse her ekosistemde sona erdi. Dünya'nın geçmişte hareketli olan mikrobik yaşamı neredeyse tamamen yok oldu. Birkaç güçlü mikrop varlığını koruyordu, tıpkı milyarlarca yıl boyunca, okyanus zeminindeki hidrotermal ağızların daimi karanlığında yaptıkları gibi. Fotosentetik su yosunlarının varlığını sürdüren diğer seyrek popülasyonları, evlerini kırılan kalın buzların aydınlık bölgelerinde ya da volkanların sıcak yan bölgelerinin yakınlarındaki sığ açık sularda bulmuş olmalı.

Dünya bu kadar uzun süreli, soğuk bir küresel kıştan nasıl kurtulmuş olabilir? Cevap gezegenimizin çok daha derin, amansız çalkantılarında yatar. Buz ve karın beyaz kaplaması, levha tektoniğini durduramadı; buzdan fırlayan yüzlerce siyah koniden çıkan volkanik gazların bitmeyen yoğunluğunu da azaltamadı. Başat volkanik gaz olan karbondioksit, atmosferde bir kez daha oluşmaya başladı. Karanın buzla örtülmesiyle birlikte, karbondioksitin kaya aşındırması ve fotosentezle zamanında ortadan kaldırılması neredeyse durdu. Karbondioksit yoğunlaşmaları kademeli olarak bir

milyar yıldan uzun süredir görülmemiş olan seviyelere, nihayetinde belki modern seviyelerin yüzlerce katına erişti ve bu da yeni bir olumlu geri bildirimi; kaçak bir sera etkisini tetikledi. Güneş ışığı hâlâ beyaz manzaraya yayılmış durumda fakat atmosferdeki karbondioksit yayılan bu enerjiyi doğrudan yüzeye geri yansıttı ve gezegeni kaçınılmaz olarak ısıttı.

Atmosfer ısındıkça, küçük Ekvator buzlu parçaları milyonlarca yıl içinde ilk kez eridi. Karanlık toprak açığa çıktıkça daha fazla Güneş ışığı soğuruldu ve ısınma arttı. Güneş ve yüzey arasındaki olumlu geri bildirimler Dünya'nın giderek daha çok ısınmasına yol açtıkça okyanuslar da beyaz örtüsünden arınmaya başladı.

Bir Gaz Vakası

Bugün pek çok bilim insanı bir diğer olumlu geri bildirimin (modern zamanlarımız için yine büyük önem taşıyan bir mekanizmanın) küresel ısınma hızını arttırmış olabileceğinden kuşkulananmaktadır. Metan (CH_4) evlerimizde “doğal gaz” olarak yaktığımız en basit hidrokarbon yakıtı, aynı zamanda bir sera gazıdır fakat Güneş enerjisinin yakalanmasında her molekülü karbondioksitten çok daha etkilidir. Metan milyarlarca yıl boyunca, muhtemelen çatışan iki mekanizmayla okyanus dibi tortularında birikmiştir. Çok daha iyi belgelenmiş, dolayısıyla çok daha az tartışmalı olan ilki, metanı normal metabolik döngülerinin bir parçası olarak salgılayan mikroplar içerir. Bu metanojenler, bilinen pek çok metan rezervinin yakınlarında, bol miktarda oksijensiz okyanus tortusu içerir, dolayısıyla geniş doğal gaz tortularının bu mikroorganizmaların sürekli hareket hâlinde oluşuyla oluşmuş olduğu düşünülür.

Yakın zamanda yapılan deneyler, muhtemelen ikinci, çok daha derin bir metan kaynağı (hiçbir şekilde biyolojiye dayanmayan bir kaynak) olabileceğine işaret etmektedir. Bazı bilim insanları derin kabukta ve üst mantoda, uç noktada ısı ve basınçların varlığını sürdürdüğü yüz altmış kilometrenin ötesinde derinliklerde, su ve karbondioksitin metan oluşturmak üzere demir içeren sıradan minerallerle tepkimeye girebileceğini iddia eder. Yüksek ısı

ve basınçlarda yapılan deneyler şüphelenilen bu derin Dünya reaksiyonlarını taklit etme girişiminde bulunur. Jeofizik Laboratuvarı'nda gerçekleştirilen, 2004 yılına ait sıklıkla alıntılanan bir çalışmada, doktora sonrası araştırmacısı Henry Scott, iki sıradan kabukla ilgili içeriği, kalsit (kalsiyum karbonat; kireç taşının sıradan karbon içeren minerali) ve demir oksidi suyla karıştırmıştır. Scott bu içerikleri hücre tabanlı elmasta yalıtmış ve örneği üç bin dereceden daha yüksek bir ısıda (üst mantoda bulunan ekstrem koşullarda) lazerli ısıtma işlemine maruz bırakmıştır. Hatırlayın, hücre tabanlı elmasa dair en iyi olan şey elmasların şeffaf oluşudur, böylelikle örneği tepkimeye girerken ve değişirken görebilirsiniz. Henry Scott örnek hazinede küçük metan kabarcıklarının oluşumunu izledi. Sudaki hidrojen, kalsitin karbonuyla tepkimeye girmiş ve doğal gazı oluşturmuştu. Rusya, Japonya ve Kanada'da yapılan diğer deneylerde, bir dizi varsayılan derin Dünya koşulu altında, hidrokarbonların benzer bir sentezi bulundu.

Bu deneyler Neoproterozoik küresel ısınmanın anlaşılmasında potansiyel olarak önemlidir, çünkü metan özellikle güçlü bir olumlu geri bildirime katkı sağlamış olabilir. Okyanus zemininin yakınında depolanan metanın büyük bir bölümü, metan hidrat denilen etkileyici bir bileşimde (su ve gazın kıtasal eğimler üzerinde çıkıntılar oluşturan buz benzeri berrak bir karışımında) tutulmuştur. (Bu dondurucu soğuk metan buzu aslında parlak bir alevle yanar; YouTube'daki videolara bakın.) Büyük miktarlarda (bazı tahminlere göre bilinen tüm diğer metan rezervlerinin toplamından kat kat fazla miktarda) metan, aşağıdan yükselen gaz soğuk deniz suyuyla tepkimeye girdiğinde oluşan bu metan buzlarının içinde kilitlenir. Kayda değer oranda ek metan buzu kutuplardaki donmuş tabakalarda (Sibirya, Kanada'nın kuzeyi ve binlerce yıldır donmuş olan diğer bölgelerdeki topraklarda) bulunur.

Uç noktada bir olumlu hava geri bildirimi, okyanus suları ufak miktarda ısındığında bile gerçekleşebilir, bu da en sık hidrat tortularının erimesine ve atmosfere bol miktarda metan gazı salınmasına neden olur. Bu metan sera gazına gözle görülür oranda katkı sağlar ve bu da okyanusların daha da fazla ısınmasına neden olur.

Bugün bazı bilim insanları, küresel ısınmayı arttırmanın yollarından biri olarak, belki Dünya'yı onlarca yıl içinde soğuktan sıcağa döndüren, olası bir okyanus zemini metanının yıkıcı Neoproterozoik salınımına işaret etmektedir.

Bu Neoproterozoik senaryo, güçlü biçimde metan kaynaklarına dayanır. Şayet mikroplar okyanusun büyük bir bölümünün doğal gazını ürettiyorsa, hidrat üretimi muhtemelen kartopu dönemlerinde gerçekleşmiştir ve metan salınımı ısınmada pek büyük bir rol oynamayabilir. Öte yandan basınçlı sıcak mantodan kayda değer oranda metan yükseliyorsa, metan hidrat hazneleri, mikrobik yaşamdan bağımsız herhangi bir küresel soğuma dönemi sırasında sürekli olarak oluşacak ve çok daha fazla geri bildirimi tetikleyecektir. O hâlde metanı -derindeki kayaları, sığ sulardaki mikropları ya da bu ikisinin bileşimini- hangi süreç oluşturmaktadır?

Metanın derin ve sığ kökenleri sorusu dolaysız bir soru gibi görünebilir fakat bu petrol ve gaz işinde uzun vadeli, bazen ateşli bir uluslararası çatışmayla renklenmiş bir sorundur. Petrol öncelikle, metanın en basit ve en çok bulunan hidrokarbon moleküllerinden oluşur. Büyük oranda, metanı oluşturan doğal süreçlerin aynı zamanda petrolün oluşumunda da rol oynadığı varsayılır.

Tartışmanın bir tarafında, en çok elementlerin yaygın periyodik tablosuyla tanınan ünlü Rus kimyager Dimitri Mendeleev'in on dokuzuncu yüzyılda kurucusu olduğu Rus-Ukrayna Okulu yer alır. Mendeleev iddialarını güçlendirecek deneylerin ortaya çıkmasından uzun süre önce, petrol için abiyojenik bir köken önermiştir. "Vurgulanması gereken başat gerçek, petrolün Dünya'nın derinliklerinde doğmuş olduğu ve kökenlerini de yalnızca orada aramamız gerektiğidir," diye yazmıştır. Mendeleev'in fikirleri, yirminci yüzyılın ikinci yarısında Rusya ve Ukrayna'da yeniden güçlenmiştir ve Rusya'nın gelişen petrol ve doğal gaz endüstrisini besler. Bazı Rus jeokimyacıları hâlâ neredeyse tüm petrol ve doğal gazın derin abiyojenik kaynaklardan çıktığını savunur. Onlara göre, bazı verimli petrol yatakları, sürekli olarak aşağıdaki geniş manto rezervlerinden beslenen yenilenebilir kaynaklardır.

Bu düşünme biçimi çoğu Amerikalı petrol jeoloğu için bilimsel sapkınlıktır; bu jeologlar petrolün bütünüyle biyolojik olan kökeni için art arda kanıtlardan bahseder: Petrol yalnızca bir zamanlar yaşamın bulunduğu tortul çevrelerde bulunur, petrol gözle görülür moleküller biyogöstergelerle doludur, petrolün izotopik yapısı özgün biçimde canlı gibi görünür, az rastlanan elementler de yaşayan bir kaynağa işaret eder. Kuzey Amerikalı petrol jeologlarının büyük bir bölümü için konu kapanmıştır: Petrol ve doğal gazın neredeyse tamamı biyojeniktir.

Onlarca yıllık Rus-Amerikan rekabetiyle kutuplaştırılan tartışma, Kuzey Amerika’da, 2004 yılındaki zamansız ölümünden önce Cornell Üniversitesi’nde öğretim elemanı olarak çalışan parlak, kavgacı, etki alanı geniş Avusturyalı astrofizikçi Thomas (Tommy) Gold tarafından yeniden gündeme getirilmişti. Gold’un bilimsel üne yönelik başat iddiası, en azından seçili astrofizik uzmanlığı dâhilinde, uzayın derinliklerinden gelen metronomik radyo dalgalarının, “pulsar”lar denilen şeylerin, aslında hızla dönen nötron yıldızları olduğuydu. (Bir dönem, bazı astronomlar bu radyo sinyallerinin uzaktaki yabancı teknolojilerden kaynaklanıyor olması gerektiğini düşündü, dolayısıyla tüm pulsarların astronomik kaynağı LGM’dir. [“Little Green Men” Küçük Yeşil Adamlar.])

Tanrı, duymanın fizyolojisinden tozlu Ay yüzeyinin tutarlılığına kadar pek çok diğer alana girmiş olsa da astrofizik dışındaki en kayda değer katkısı petrol ve doğal gazın inorganik kökenlerini savunmaktı. Petrolün salt gelişen bir mikroplar topluluğu (“derin sıcak biyosfer”) inorganik hidrokarbonları yiyecek olarak kullandığı için biyolojik göründüğünü iddia ediyordu. Dolayısıyla mikroplar inorganik hidrokarbonları gözle görülür biyokimyasal işaretleriyle -hopane’ler, lipidler ve daha fazlasıyla- yeniden basar. Gold, bu hipotez temelinde, volkanik ve başkalaşmış kayalar gibi geleneksel olmayan yerlerde hidrokarbon keşfini savunmuştur. Hatta bir İsveç şirketini bu türden sert kayalara bir araştırma kuyusu açmaya ikna etmiştir; bu karmaşık olmakla birlikte şaşırtıcı sonuçlara yol açan (ve pek çok mutsuz yatırımcının çokça para kaybetmesine neden olan) bir yatırımdır.

Bu argümanın her iki tarafını da dikkatlice dinleyecek olursanız hidrokarbonun kökenlerine ilişkin sorunun henüz cevaplanmamış olduğu açıkça ortaya çıkacaktır. Tommy Gold sınırsız bir merakla sahipti ve sorularına cevap bulma konusunda istekliydi. Beklenmedik ölümünden kısa bir süre önce, derin, sıcak biyosfer hakkında konuşmak ve olası bir iş birliğini (konunun çözümlenmesine yardımcı olabilecek deneyleri) tartışmak için laboratuvarıma geldi. Metanın kökenlerine ilişkin kritik soru hâlâ cevaplanmamış değil fakat bu cevaplanamayacak bir soru da değil. İhtiyacımız olan şey derin karbonu anlama yönünde yeni, uluslararası bir çaba.

Derin Karbon Gözlemevi

Karbonun Dünya'daki en önemli element olduğu söylenebilir. Karbon, Dünya'nın değişken ikliminin ve çevresinin anlaşılmasındaki temel unsurdur. Karbon, enerji arayışımızda uzun süredir temel element olmuştur ve bu özelliğini sürdürmektedir. Karbon aynı zamanda yaşamın da önemli bir elementi ve dolayısıyla yeni ilaçların ve başka pek çok ürünün tasarımında kullanılan temel elementtir. Karbonu, yalnızca okyanusların, atmosferin, kayaların ve yaşamın derinlemesine incelenen yüzey döngüleri bağlamında değil, kabuktan çekirdeğe kadar da anlamamız gerekir.

Böylelikle, 2009 yılının yazında, Alfred P. Sloan Vakfı ve Jeofizik Laboratuvarı, Derin Karbon Gözlemevi, gezegenimizdeki karbon, özellikle Dünya'nın derinliklerindeki kimyasal ve biyolojik rolleri üzerinde çalışmak için on yıllık büyük bir program başlattı. Karbon nerededir? Aşağıda ne kadarı bulunur? Özellikle yüze ve yüzeyden aşağıya doğru nasıl hareket eder? Derin biyosfer ne ölçüde genişler? Bu disiplinler arası, uluslararası çaba şimdiden düzinelerce ülkeden yüzlerce araştırmacının ilgisini çekmiştir. Derin mikrobik yaşamın küresel bir sayımını tamamlamaktan, Dünya'daki tüm aktif volkanlarda bulunan karbondioksit emisyonlarını denetlemeye kadar pek çok hedefimiz vardır. Fakat metandan petrole kadar, yeryüzündeki hidrokarbonların kökenlerini keşfetmek, Derin Karbon Gözlemevi'nin en önemli misyonudur. Her ikisi de

Los Angeles'taki California Üniversitesi'nde görevli olan jeokimyacı Ed Young ve meslektaşı Edwin Schauble, izotopların okyanus zeminindeki bir metan sızıntısını oluşturanın bir kaya mı yoksa bir mikrop mu olduğunun belirlenmesinde önemli bir rol oynayacağını düşünür. Fakat kuramsal hesaplamaları, ağır izotoplar karşısında hafif izotopların herhangi bir sıradan ölçümüyle test edilemez. Ed Young "izotopologlar"ı ölçmek istemektedir.

İzotopologlar izotoplarının düzenlenişi açısından farklılaşan kimyasal açıdan özdeş moleküllerdir. Tek bir karbon atomu ve dört hidrojen atomu olan metanın çeşitli izotopologları vardır. Tüm karbon atomlarının yaklaşık yüzde 99,8'i daha hafif karbon-12 türündendir, öte yandan her beş yüz atomdan biri daha ağır karbon-13 izotopudur. Aynı şekilde hidrojen daha hafif bir versiyonuyla (teknik açıdan "hidrojen-1" olarak, fakat her zaman basit biçimde hidrojen göndermesiyle) gelir, tıpkı her zaman döteryum olarak adlandırılan hidrojen-2 izotopu gibi. Yeryüzünde tipik hidrojen-döteryum oranı yaklaşık binde birdir. Bu oranlar yaklaşık beş yüz metan molekülünden birinin bir karbon-13 izotopu, bin metan molekülünden yaklaşık dördünün ise bir döteryum içerdiği anlamına gelir.

Bu iki ağır izotoptan herhangi birinin eser miktarlarının ölçümü oldukça zordur fakat Ed Young ve meslektaşlarının yapmaya çalıştığı şey bu değildir. Onlar tanımlanması zor, iki kez kullanılan metan izotopologlarını (hem bir karbon-13'ü hem de $[^{13}\text{CH}_3\text{D}]$ olarak gösterilen) bir döteryumu ya da iki döteryumu $[^{12}\text{CH}_2\text{D}_2]$ içeren) kabaca milyonda bir metan molekülünü ölçmek ister. Edwin Schauble'ın hesaplamalarına göre, nadir bulunan bu iki izotopologun herhangi bir verili metan örneğinde, metanın oluştuğu ısı'nın duyarlı bir göstergesini sunması gerekir. Isı asıl unsurdur: 200 derecenin altındaki ısılarda bir metan yığını oluştuysa bu mikrobik olmalıdır; şayet 1000 derecenin üzerindeki ısılarda oluştuysa büyük ihtimalle inorganiktir.

Fikir kâğıt üzerinde harika görünüyor. Sorun şu ki dünyada $^{13}\text{CH}_3\text{D}$ 'nin $^{12}\text{CH}_2\text{D}_2$ 'ye oranını açıklığa kavuşturabilecek bir araç yok. Geleneksel izotop analizi kütle spektrometresi, molekülleri

kütlelerine göre ayırma süreci üzerine kurulu. Bu iki izotopolog kütleli açıdan yüzde birden daha düşük bir oranda fark gösterir ve bu da bir türün diğerinden ayrılmasında gözle görülür sorunlar ortaya koyar. Dahası, izotopologlar geleneksel analize meydan okuyan oldukça düşük yoğunlaşmalarda bulunur. Ed Young ve meslektaşları hem kütleli çözümlemeyi hem de moleküler duyarlılığı arttıran yeni bir araca gereksinim duyar. Bu nedenle, Derin Karbon Gözlemevi'nin ilk eylemlerinden biri, özel olarak metan izotopolog oranlarını ölçmek için tasarlanmış 2 milyon dolarlık prototip bir aracın finanse edilmesine yardımcı olmaktı. (ABD Ulusal Bilim Vakfı, ABD Enerji Birimi, Shell Petrol Şirketi ve Washington Carnegie Enstitüsü'nün çabayı desteklemesi de tatmin edici bir iş birliğidir.) Bu riskli bir çabadır. Aracı inşa etmek yıllar alacak, aracın çalıştığını bilmemiz için de yıllar geçmesi gerekecektir. Fakat derin metanın kaynakları sorusunun mutlak bir cevabını ve bunun sonucunda ortaya çıkan Dünya'nın iklimini değiştirebilecek metan güdümlü bir geri bildirim döngüsünün iç yüzünü anlamak için, risk almaya değerdir.

Değişim Döngüleri

Geçmişte, Neoproterozoik Dünya'da, yedi yüz milyon yıl önceki ilk kartopu döneminin sonunda, iklim değişikliğinin son noktasına erişilmişti. Karbondioksit oranının kaçınılmaz yükselişi bunda büyük bir rol oynamıştır; metanın hidratlardan ani biçimde salınımı da katkı sağlamış olabilir. Jeolojik anlamda göz açıp kapayıncaya kadar (belki bin yıldan çok daha kısa bir süre içinde) iklim sendeledi. Sıcaklıklar rekor seviyelere çıktıkça, kartopu Dünya sera Dünya'ya dönüştü.

Uzun süre, belki otuz milyon yıl boyunca, ılık bir iklim varlığını sürdürdü fakat sera kendi sonunu kesinleştirdi. Atmosferdeki artan karbondioksit yoğunlaşmaları kademeli olarak uç noktalarından aşağılara indi. Sera gazının bir bölümü kayalarla tepkimeye girerek yok oldu. Atmosferdeki yüksek CO₂ oranının bir sonucu olan aşındırıcı karbonik asitle yüklü yağmura maruz kalan çorak

hâle gelmiş kara, hızla aşındı. Mineral besinlerin, Güneş ışığının canlanmasıyla başlayan akını, su yosunlarının sera gazını yok edecek biçimde aniden ortaya çıkmasıyla sonuçlandı. Tüm bu olaylar karbon izotop kalıntılarında gerektiği gibi korunmuştur.

Dolayısıyla bunu izleyen 150 milyon yıl içinde, Dünya bu uç noktalar arasında dolaşım içinde olmuştur. Buz bir ya da iki kez değil en az üç kez toplanmış ve geri çekilmiş, küresel iklim kutuplardan tropik bölgeye ve yine geriye doğru sarhoşlukla savrulmuştur. Sturtian buzullaşması denilen ilk dönem, yaklaşık 720 milyon yıl kadar önce, en üst seviyeye erişmiştir. Marinoan buzullaşma dönemi 650 milyon önce ve daha az yoğun olan Gaskiers buzullaşma dönemi ise 580 milyon yıl önce yaşanmıştır. Bir düzine ülkedeki kalın kaya birikintileri bu dramatik döngünün ayrıntılarını açığa çıkarır. Buz geriledikçe, buzullar arkalarında parçalanmış iri kaya parçası yığınları ve büyük kayalar, yumrulu tillitler ve yuvarlak parlak bir ana kaya bırakmıştır. Çok geçmeden karbonat minerallerin kalın kristal tortuları tillit katmanlarını kaplamıştır; bu ısınan okyanusların bir diğer belirleyici göstergesidir. Karbonatlar CO₂ 'nin son derece yoğun biçimde bulunduğu denizlerde öyle hızlı biçimde oluşmuştur ki kilometrelerce uzunluktaki dev kristaller sığ okyanus zeminini örtmüştür. Bu aceleci birikintiler Dünya'nın işkence gören yüzeyinin kimyasal dengesini yitirdiği (sıkıcı milyar durgunluğunu sonsuza dek geride bıraktığı) bir döneme işaret eder.

Jeologlar, Paul Hoffman'ın kartopu Dünya'ya ilişkin 1998 tarihli yayınından sonra bir süreliğine donmuş gezegen senaryosunu benimsedi fakat bu artık geçerliğini yitirmiştir. İklim modelleyicileri Dünya'nın tamamını buzla kaplamayı güç buldu, çünkü hesaplamaları, gözle görülür soğuma dönemlerinde dahi, Ekvator'un ılıman kalması gerektiğine işaret ediyor. Bugün alanda çalışan jeologlar hareket eden buzların, yüzey dalgalarının ve en yüksek donma noktası sırasındaki okyanus akımlarının kanıtlarını (en azından bazı açık su göstergelerini) buluyor. Jeologların çoğu için katı kartopunun yerini daha iyimser bir sulu kartopu senaryosu,

alt edilecek yeni model almıştır. Hoffman, sulu karın buzullaşma oranının en yüksek olduğu dönemin hemen öncesindeki ve sonrasındaki koşulları temsil edebileceği fikrine karşı çıkar.

Farkı nasıl söyleyebiliriz? Katı kartopunu destekleyen etkileyici bir kanıtlar dizisi, buzun Dünya'yı kapladığı düşünülen dönemle yaklaşık olarak aynı zaman diliminde başlayan damarlı demir oluşumlarının çarpıcı, kısa ömürlü bir titreşimidir. Bu tür tortuları açıklamak güçtür, çünkü okyanuslar demirlerinden bir milyar yıldan uzun süre önce, sıkıcı milyarın başlangıcından önce arındırılmıştı. O hâlde demir okyanuslara yeniden nasıl dolmuştur? Modellerden birinde kartopu evresinin okyanusu mühürlediği, okyanus suyu kolonuna giden tüm oksijeni kestiği iddia edilir. Bu sırada deniz tabanındaki hidrotermal ağızlar mantodan derin okyanusa doğru taze demir pompalamayı sürdürmüştür. Demir yoğunluğu kademeli olarak artmış, ancak buzul çağları sona erdiğinde yeni damarlı demir oluşumları olarak hızla tortulaşmışlardır.

Sulu kartopuna karşı kartopu: Bu türden karşıtlıklar bilimde yeni değildir ve bu karşıtlık ılımlı, çoğundan daha samimi kalmıştır. Paul Hoffman emekli oldu ve zorluğu yeni nesil göğüsledi, çünkü cevaplar hâlâ kayalarda gizli.

Buzun Gizemi

Daha büyük bir gizem varlığını koruyor. Kartopu/sulu kartopu evreleri hiçbir şekilde Dünya'daki ilk buzullaşma dönemleri değildi, son da olmayacaklardı fakat üç başat Neoproterozoik ara dönem diğerleri karşısında öne çıkar. Elimizdeki veriler doğrultusunda bu türden uç noktada bir soğuk hava dalgasının daha önce hiç yaşanmamış olduğu ve o dönemden beri de hiç yaşanmadığı söylenebilir. Bu neden böyle olsun? Dünya tarihinin kısa bir dönemi nasıl diğer tüm dönemlerden farklı olmuş olabilir?

Her ikisi de kaya kayıtlarında iyi korunan daha önceki iki buzullaşma dönemi, açık biçimde çok daha az şiddetliydi. Bilinen ilk buz ilerleyişi, antik Güney Afrika kratonlarında tillit tortularının oluşumuyla açığa çıkan görece kısa olay, yaklaşık 2,9 milyar

yıl kadar önce, Arkeyan Devir'in ortasında gerçekleşti. Dünya'daki buzulların kutuplardan yayılmasının bu kadar uzun zaman alması, kendi içinde gizemli bir durumdur. Dünya tarihinin daha önceki evresinde Güneş çok daha solgundu; ilk birkaç milyon yıl içinde bugünkü parlaklığının yalnızca yüzde yetmişi oranındaydı ve orta- Arkeyan buzullaşması sırasında da yaklaşık yüzde sekenden fazla değildi. Güneş'ten çok daha az enerji gelirken, diğer ısıtma mekanizmaları devreye girmiş olmalıdır. Pek çok bilim insanı, olası ılımlılaştırıcı etkiler arasında öncelikli olarak çok daha yüksek sera gazı (karbondioksit, metan ve turuncu hidrokarbon pusu) seviyelerine işaret eder. Dünya'nın çalkantılı derin bölgesinden daha yüksek ısı akışları ve daha büyük volkanik faaliyetler de havanın ılımlı hâle gelmesinde rol oynamış olmalıdır.

Tuhaf biçimde, Dünya'nın ilk buzul çağının oluşumuna kısmen çok fazla sera gazı neden olmuş olabilir. Atmosferdeki metan artsaydı stratosferdeki yüksek reaksiyonlar, ilksel Dünya'nın puslu turuncu bir gökyüzüne sahip olmasına neden olabilecek büyük hidrokarbon moleküllerini giderek daha fazla üretti. Bu pus fazla kalınlaşırdı, Güneş enerjisinin bir bölümü engellenir ve Dünya soğurdu.

Yaklaşık 2,4 ila 2,2 milyar yıl öncesi arasındaki, geniş buzul tortularının hâkim olduğu ikinci, daha uzun bir soğuma dönemi, ekvatorial Kenorland süper kıtasının ayrılmasından sonra gerçekleşti. Atmosfer modellemesinde, yeni oluşan kıyılardaki artan aşınma ve tortu birikiminin o dönemde mevcut olan karbondioksitin büyük bölümünü tükettiği öne sürülür. Eş zamanlı olarak, oksijenin yükselişi, diğer önemli sera gazı olan atmosferik metanın sonunu getirdi. Muhtemelen modern seviyelerin yüzde seksen beşi oranında olan solgun Güneş, aynı ölçüde etkili bir serayı kalıcı hâle getirmek için yetersizdi, dolayısıyla bunu uzun süreli soğuk bir dönem izledi.

Bunu izleyen 1,4 milyar yıl içinde (sıkıcı milyar da dâhil Dünya tarihinin yaklaşık üçte biri boyunca) bir buzul çağına ilişkin bulunan hiçbir iz yoktur. Dünya'nın iklimi, gözle görülür bir dengede kalmış gibi görünüyor, ne çok sıcak ne de çok soğuk. Değişimlerin

bu denli sınırlı olduğu bu kadar uzun bir zamanı açıklayabilmek için, tümü bir durağanlık dönemine katkı sağlamış olabilecek olası olumsuz geri bildirimlerin bir tekrarını isteyebiliriz fakat bariz bir etki olmadığında nedeni saptamak güçtür. Kesin olarak söyleyebileceğimiz şey, Dünya'nın kabaca 740 milyon yıl kadar önce bir taşma noktasına eriştiği ve kartopu-sera döngüsünün ortaya çıktığıdır.

İkinci Büyük Oksitlenme Olayı

Canlı Dünya bu türden uç noktadaki küresel değişikliklere karşı duyarsız değildi; en az son 3,5 milyar yıllık dönem boyunca, jeosferdeki değişiklikler biyosferi oldukça fazla etkiledi. Dünya sıcak ve soğuk uç noktalar arasında sendeledikçe korunmasız ve aşınmış kıtasal kıyılar sahil ekosistemlerine önemli besin katkıları sağladı. Fotosentez için gerekli olan manganez, bu türden hayati bir mineraldi. Nitrojenin işlenmesi için kullanılan molibden ve çeşitli metabolik roller verilen demir de bol miktarda bulunuyordu. Fakat tüm kimyasal elementler arasında, fosfor Neoproterozoik denizlerdeki en önemli element olmuş olabilir. Fosfor tüm yaşam için gereklidir. DNA ve RNA genetik moleküllerinin omurgasının oluşturulmasına yardımcı olur, pek çok hücre zarını dengeler ve kimyasal enerjinin her hücrede muhafaza edilmesinde ve aktarılmasında temel bir rol oynar.

Fosforun öyküsü, doktora sonrası araştırmasını Jeofizik Laboratuvarı'nda yapan meslektaşım Dominic Papineau'yu büyülüyor. Papineau'nun Fransız Kanadalı kökenleri, kibar aksanından kolayca anlaşılır; Dünya'nın en eski oluşumlarına duyduğu tutku Boston Koleji'ndeki kayalarla dolu odasının her köşesinde açıkça görülebilir. Cilalı stromatolit parçaları ve damarlı demir oluşumları uzak bölgelerdeki pek çok çalışmasını kanıtlar niteliktedir.

Papineau, bazı ekosistemlerde, mikrobik büyüme boyutunun doğrudan kullanılabilir fosfor oranıyla ilişkili olduğunu fark etmiştir. Beklenmedik oranda besinin Neoproterozoik Devir'in sığ sahillerine aktığı bir dönemi gözünde canlandırır. Dünya'nın en geniş fosforit tortularından bazıları (fosfor-yoğun hücreler olarak

biriken, ölen ve dibe çöken hücreler) kartopu-sera döngüleriyle aynı zaman aralıklarında yoğunlaşır. Bu antik fosforit tabakaların arayışı içinde, farklı jeolojik ortamları ve büyüleyici kimyaları üzerinde çalışmak için yerkürede (Kanada'nın kuzeyinde, Finlandiya'da, Afrika ve Hindistan'da) dolaşmıştır.

Fosfor güdümlü yosun patlamaları atmosferdeki oksijeni farklı seviyelere, muhtemelen yüzde on beşlik solunabilir yoğunluklara çekti. Fakat çelişkili biçimde, okyanus zeminine çöken çürüyen su yosunu yığınları, hızla su kolonundaki oksijenle tepkimeye girecek, derin okyanusları ölümcül seviyede oksijensiz bir duruma sokacaktı. Dolayısıyla yaşamın kartopu Dünya'yı izleyen dirilişi, yüzeye yakın oksijen-yoğun, alt katmanlarda oksijensiz bir okyanusun oluşumuyla sonuçlanmış olabilir. Dominic Papineau, gübre akışıyla geniş fosfat akışlarının benzer yosun patlamalarını ve derin suların oksijensiz ölü kuşaklarını tetikleyebildiği bugünün kıyı bölgeleriyle de güçlü paralellikler görür.

Bu da bizi mineral evriminin en önemli ilkelerinden birine geri götürür: Jeosfer ve biyosferin birlikte evrimine. Yaşam mineraleri değiştirirken bile mineraller yaşamı değiştirir. Kırk yıl kadar önce jeoloji alanında lisansüstü çalışmalarına başladığımda, biyoloji jeolojiyle neredeyse ilgisiz görünüyordu. Büyük kaya döngüsü, yaşam döngülerinden ayrı değerlendiriliyordu. Tez danışmanıma son seçmeli ders olarak biyoloji dersini almam gerekip gerekmediğini sorduğumda, beni bunun yerine kuantum mekaniğini almaya ikna etti. "Biyolojiyi hiçbir zaman kullanmayacaksın," diyerek bana güvence verdi.

Dünya evriminin, yaşamın kökenlerinden itibaren her aşamasında, yaşamın jeolojiyi, jeolojinin de yaşamı etkilediği göz önünde bulundurulduğunda, bu şüpheli bir öneridir. 2006 yılında, California Üniversitesi'nin Riverside kampüsünden jeokimyacı Martin Kennedy ve dört ortak yazar, bu karşılıklı bağımlılık durumunun kurgusal olmakla birlikte özel bir özgünlüğü olan bir örneğini sundu. Makaleleri "The Inception of the Clay Mineral Factory," *Science* dergisinin 10 Mart sayısında yer aldı. Zekice yazılmış tezlerine göre atmosferdeki oksijenin düşük bir yüzdeden mevcut

düzeyine çıkması, mikroplar ve kil mineralleri arasında olumlu geri bildirimlerle artmıştı.

Kil temelde suyu emen ve yapışkan, vıcık vıcık kütleler oluşturan oldukça ince taneli mikroskobik mineral parçalarından oluşur. Daha önce ayağınız ya da arabanız derin, sulu kile saplandıysa bunu çabuk unutmazsınız. Kil minerali oluşumunun temel biçimlerinden biri aşınma, özellikle son Neoproterozoik Devir'in nemli, asidik koşulları altında kimyasal değişim yoluyla aşınmadır. Kennedy ve iş arkadaşları, kıtaların hızlı buzul sonrası aşınmasının üç büyük kartopu-sera döngüsü öncesine göre gözle görülür biçimde daha fazla kil minerali ürettiğini öne sürer. Dahası, mikrobik kolonilerin kıyı bölgelerini yaklaşık olarak bu dönemde kolonileştirmeye başladığına ve mikropların özellikle sert kayayı yumuşak kile dönüştürmekte etkin olabileceğine ilişkin kanıtlar artmaktadır.

Kil minerallerinin en çarpıcı özelliklerinden biri organik biyomoleküllere bağlanma becerileridir. Kil minerallerinin üretimindeki artış karbon-yoğun biyokütleyi ayıracak ve kil mineralleri okyanuslarda yıkanırken, bu karbonu kalın ince kumlu tortulara böleceklerdi. Kennedy senaryosuna göre, karbonun gömülmesi oksijenin artmasına yol açmış, toprak üzerinde kil minerallerinin kimyasal üretimini daha da arttırmış ve bu da daha fazla karbonun gömülmesiyle sonuçlanmıştır. Dolayısıyla "kil mineral fabrikası" doğrudan atmosferdeki oksijenin artışına ve canlı modern Dünya'nın evrimine katkı sağlamış olabilir.

Hayvanların Ortaya Çıkışı

Fosfor ve diğer besinlerle desteklenen sera su yosunu patlamaları, kuşkusuz atmosferdeki oksijenin ani artışlarına katkı sağlamıştır. Su yosunu mineral fabrikası bu etkiyi güçlendirmiş olabilir. Dolayısıyla yaklaşık 650 milyon yıl öncesine gelindiğinde, atmosferdeki oksijen modern zamana yakın seviyelere yükselmişti. Böylece artan oksijen de karmaşık çok hücreli yaşamın yükselişine dâhil edildi, çünkü organizmalar ancak bu kadar yüksek oksijen seviyeleriyle denizaneleri ve solucanların aktif, enerji gerektiren yaşam

tarzlarını benimseyebilirdi. Gerçekten de bilinen ilk çok hücreli organizmalar fosil kalıntılarında yaklaşık 630 milyon yıl kadar önce ikinci küresel kartopu buzullaşmasından hemen sonra görülür.

Neoproterozoik Devir'de hayvan yaşamının ortaya çıkışını anlamak için öncelikle daha da geriye, bir milyar yıl öncesinden daha uzak bir geçmişe, sıkıcı milyardan hemen önceki döneme bakmamız gerekir. Nadir fosil kanıtları yaklaşık iki milyar yıl önce bütünüyle yeni türde tek hücreli bir yaşamın yükselişine işaret eder. Bu dönemden önce, tüm hücreler karşılıklı olarak bağımlı olsa da fiziksel olarak ayrı yaşamlar sürdürmüş görünür. Fakat yaklaşık iki milyar yıl önce, ilk kez Massachusetts Üniversitesi'nin Amherst kampüsünde biyolog Lynn Margulis'in yorumladığı devrimci bir fikre göre, bir hücre diğer bir hücreyi bütün olarak yutuyordu. Daha büyük olan hücre, yutulan hücreyi sindirmek yerine, daha küçük olanı Dünya'daki yaşamı sonsuza dek değiştirecek sembiyotik bir ilişki içinde seçiyordu.

Margulis yaratıcı bir dinamo ve entelektüel bir hepçildir. Bilimsel kariyerini organizma gruplarının etkileşime girme ve birlikte evrim geçirme biçimini anlamaya adanmıştır; sembiyotik ilişkileri ve biyolojik buluşların paylaşımını yaşamın tarihinde yaygın bir konu olarak görür. Fikirleri, kısmen öncelikle mutasyon ve seçim yoluyla daha Ortodoks Darwinci evrim görüşünden saptıkları için birkaç kişiyi kızdırmaktan fazlasına yol açmıştır. Uyuşmazlıklara karşın, Margulis'in endosimbioz teorisi ikna edicidir ve bugün neredeyse evrensel olarak kabul edilmektedir. Modern bitkiler, hayvanlar ve mantarlar da pek çok iç yapısı olan hücreler içerir; küçük elektrik santralleri gibi hareket eden mitokondriler, Güneş'in enerjisini fotosentetik organizmalarda dizginleyen kloroplastlar ve genetik DNA molekülünü içeren hücre çekirdeği. Bunlar ve karmaşık hücrelerdeki diğer "organeller" kendi hücre zarlarına ve bazı durumlarda kendi DNA'larına da sahiptir. Margulis bu organellerden her birinin yutulan ve nihayetinde özel biyokimyasal görevler yerine getirmek üzere seçilen daha önceki, daha basit hücrelerden doğduğunu öne sürmüştür. En iyi tahminimiz, değişimin

yaklaşık iki milyar yıl önce gerçekleşmeye başlamış olduğu ve çok daha karmaşık, çok hücreli bir yaşama ortam hazırladığıdır.

Margulis yaşamın evriminin sembiyozla ve niteliklerin birbirinden ayrı organizmalar arasında paylaşımıyla işlediğini düşünmeyi sürdürür; bu endosimbiyozun çok ötesine taşıdığı (ve zaman zaman onu ana akımın dışında konumlandıran) bir görüştür. Denver, Colorado'da, jeologlar buluşmasında, güzel biçimde özetlenen yakın zamana ait mücadelelerinden biri, İngiliz biyolog Donald Williamson'ın tartışmalı bir fikrini destekler. Williamson 2009 yılında kelebeklerin birbirinden oldukça farklı iki hayvanın (solucan benzeri tırtıl ve kanatlı kelebeğin) genetik materyalinin birleşmesini temsil ettiğini öne sürmüştür. Margulis onun Ulusal Bilimler Akademisi'nin bir üyesi olarak ayrıcalıklı konumunu hakem denetim sürecini kısa kesmek ve Williamson'ın akademinin itibarlı *Proceedings* dergisindeki yayınına desteklemek için kullandığında tartışma şiddetlenmiştir. Bazı üyeler öfkelenerek hipotezin "saçma" olduğu, bilimsel bir dergiden çok *National Enquirer*'a yakıştığı değerlendirmesinde bulunmuştur. Margulis, Williamson'ın makalesinin ciddi bir inceleme ve tartışmaya değer olduğunu savunarak bu görüşlere karşı çıkmış, "Kimsenin Williamson'ın fikirlerini kabul etmesini istemiyoruz, yalnızca onları refleksle gelen ön yargı temelinde değil bilim ve ilim temelinde değerlendirmesini istiyoruz," sözlerini sarf etmiştir.

Tartışmanın nihai sonucu ne olursa olsun, Margulis'in endosimbiyoz teorisi bugün geleneksel düşüncedir. Neoproterozoik Devir'e gelindiğinde, çekirdekleri ve diğer içsel yapıları olan karmaşık hücreler net biçimde anlaşılmış ve yeni bir sembiyotik eşiği geçmeye hazır hâle getirilmiştir. Altı yüz milyon yıldan uzun süre önce, tek hücreli organizmalar iş birliği yapmayı, toplanmayı, uzmanlaşmayı ve büyüyerek toplu hareket etmeyi öğrenmiştir. Hayvanlara dönüşmeyi öğrenmişlerdir.

Hayvanların hâkim olduğu bir ekosistemden ilk fosil kanıtları, Edikara Dönemi denilen, yaklaşık 635 milyon yıl kadar önce, üç büyük kartopu Dünya olayının ikincisinden hemen sonra başlayan dönemdir. Farklı desenleri olan ilk fosiller (isimden de

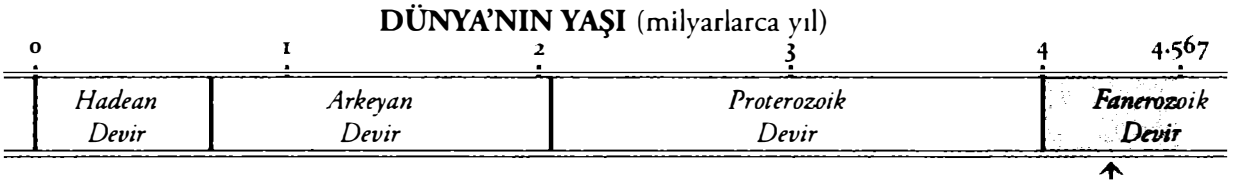
anlaşılabileceği gibi) Avustralya'nın güneyindeki Edikara'da bulunan 580 milyon yaşındaki kayalarda görülmüştür. Muhtemelen denizanaları ve solucanların akrabaları olan bu yumuşak bedenli hayvanlar, altmış santimetreye kadar genişlikte, süslü çizgili kreplere ya da tuhaf damarlı yapraklara benzeyen hoş simetrik izler bırakıyordu. Sonraki aşamada, tüm dünyada yaklaşık 610 milyonla 545 milyon arası yaştaki kayalarda benzer fosiller bulundu. Oldukça önemli biçimde, Çin'in güneyinde bulunan 633 milyon yaşındaki fosfat-yoğun Doushantuo oluşumu hayvan yumurtaları ve embriyolar olarak yorumlanan mikroskobik hücre kümeleri içerir. Marinoan buzullaşmasından hemen sonra sığ denizlerde gelişen bu yapılar her anlamda modern hayvan embriyolarıyla aynı görünür.

Dolayısıyla yoğun kartopu-sera döngüsü nihayetinde modern dünyanın evriminde temel bir rol oynamış gibidir. Hatta biz çok hücreli organizmaların varlığımızı, sekiz yüz milyon yıl önceki, Dünya'nın sürekli Güneş ışığı ve ısıyı hapseden CO₂'nin onu sıcak tuttuğu dönemden sonra, iklimsel bir taşma noktasına eriştiği o ana borçlu olduğumuz söylenebilir. Bu karbondioksit yeni Ekvator kıtalarının aşınmasıyla hızla tüketildiğinde ve yansıtıcı buz her iki kutuptan Ekvator'a yayıldığında, Dünya'daki sıcaklıklar milyonlarca yıl boyunca düştü; ta ki düzenli CO₂ artışı, belki metanın okyanus zeminlerinden hızla salınımıyla da güçlenerek, eşit ölçüde hızlı bir denetimsiz sera etkisini tetikleyinceye dek.

Bu çılgınca değişken kartopu-sera döngüleri, belki Dünya tarihindeki tüm diğer olaylardan daha fazla, dengesi bozulan bir gezegeni açığa çıkarır. Değişken Neoproterozoik iklim, atmosferdeki oksijende doğrudan beklenmedik bir artışla sonuçlanmıştır, bu ilk hayvan, bitki ve kıtaların sömürgeleştirilmesinin yolunu açan bir geçiştir. Bu türden bir biyolojik yenilikle birlikte, evrim geçiren Dünya çok geçmeden yeniliklerle kuşatıldı; yüzen, oyuk açan, süren ve uçan yaratıklar daha da uç noktalarda çevrelere ve davranış biçimlerine sahipti. Gerçekten de 650 milyon yıl kadar önce oksijen-yoğun bir atmosferin oluşumuyla birlikte, Dünya'nın uzun tarihinde ilk kez, zamanda yolculuk yapan sizler bu antik yabancı

topraklar üzerinde durabilir ve acı içinde ölmeden derin bir nefes alabilirdiniz. İlk kez, yeşil balçıklardan yavan da olsa yiyecek bir şeyler çıkarabilir, bu sırada ölümcül dozda ultraviyole ışımadan sakınabilirdiniz.

Bugün bir kez daha dramatik bir iklim değişikliği dönemine giriyoruz ve olumlu geri bildirimler etkin olmaya başlamış gibi görünüyor. Yansıtıcı buzullar giderek artan bir hızla eriyor ve gittikçe daha fazla okyanus ve kara parçasını Güneş enerjisini daha fazla soğurmaya açık hâle getiriyor. Ağaçlar kesiliyor, yakılıyor ve böylelikle kritik CO₂ tüketen ormanın boyutunu küçültürken atmosfere daha fazla karbondioksit pompalıyor. Belki de oldukça tehlikeli biçimde, donmuş tabakalardan ve derin okyanus buzlarından metan salınımının artışı, daha fazla metanın salınımını tetikleyerek küresel sıcaklıkların daha fazla artmasına yol açabilir. Şayet Dünya'nın geçmişinden yaşadığımız zaman için herhangi bir ders çıkarılacaksa Neoproterozoik Devir'in ani iklim değişimi öyküsü listenin en üstünde yer almalıdır. Çünkü kartopu-sera kaymaları gelişen yaşam için yeni fırsatlar sunarken dahi her iklim değişimiyle birlikte neredeyse canlı olan her şey ölmüştür.



Onuncu Bölüm

Yeşil Dünya

Kara Biyosferinin Yükselişi

Dünya'nın Yaşı: 4 ila 4,5 milyar yıl arası (son 542 milyon yıl)

Levha tektoniği Dünya'yı kendisinden korudu. Ağır ağır, durmaksızın, Dünya'nın ısı yayan iç bölgesi, Ekvator bölgesindeki yayılan Rodinian süper kıtasının kopuşunu daha yönetilebilir parçalara ayırdı. Kıtasal kütleler kutba doğru kayarak Ekvator'u buzun toplandığı topraklardan kurtardı ve aşırı kartopu-sera döngüsünü ılımlı hâle getirdi. Yeni yoğun fotosentetik su yosunu yaşamı da oksijen yoğunlaşmalarını modern yaşam seviyelerine yükseltirken karbondioksitin yabanıl dalgalanmalarını bastırmaya yardımcı oldu. Dünya o dönemden beri, Fanerozoik Devir'den öncekilere benzer küresel ısı aşırılıklarını deneyimlemedi.

Son 542 milyon yıl içinde, Dünya'da en az beş farklı türde değişiklik devredeydi. Kıtalar kaymayı sürdürdü, önce bir başka büyük süper kıtayı oluşturacak biçimde bir okyanusu kapattılar, sonra hâlâ genişlemekte olan Atlantik Okyanusu'nu oluşturmak üzere koptular. İklim, Neoproterozoik Dönem'in kartopu-sera uçlarında olmasa da pek çok kez sıcaktan soğuğa, soğuktan sığağa dalgalandı. Oksijen üçüncü bir büyük zenginleşme olayını deneyimledi ve atmosfer yoğunlaşmalarının yarı yarıya düşüşüne ve yeniden sıçrayışına tanıklık etti. Deniz seviyeleri de tekrar tekrar

değişerek Dünya'nın kıyılarını dramatik biçimde yeniden şekillendirdi; kaya kayıtları sıklıkla yüzlerce kilometrelik sayısız yükseliş ve düşüşü açığa çıkarır. Fakat en çarpıcı olan, yaşamın radikal ve geri dönüşü olmayan biçimde değişmiş ve evrilmiş olmasıdır. Tüm bu dönüşümler boyunca yaşam ve kayalar bir arada evrilmiştir.

Dünya her zaman bir değişim gezegeni olmuştur fakat Fane-rozoik Devir'in öyküsü çok daha dikkat çekicidir ve daha kapsamlı ve daha az değişmiş kaya kayıtları sayesinde, çeşitliliklerinde benzer şekilde daha ayrıntıcı ve incelikli görünür. Bu zengin öykünün temelini yaşamın yeni keşfedilen dayanıklı sert parçalar (dişler, kabuklar, kemikler ve tahta) üretme becerisinin bir sonucu olan bol miktarda özenle korunmuş fosil oluşturur. Hayvan ve bitkilerin Dünya'nın yüzeye yakın çevresindeki değişikliklere karşı özellikle duyarlı olduğu, dolayısıyla fosilleşmiş kalıntılarının art arda uyumlanma bölümleri oluşturduğu ortaya çıkar. Mikroplar neredeyse her fırtınayla başa çıkabilir; bu esneklik, fosil kalıntılarındaki işlevsiz basit biçimleri ve seyreklikleriyle birlikte, mikrop-ların hâkim olduğu dönemde, Prekambriyen kayalarında hiçbir bariz kitlesel yok oluşun görülemediği anlamına gelir. Fakat Fane-rozoik Devir bütünüyle farklı bir hikâyedir.

Dolayısıyla, son 542 milyon yıl içinde Dünya'yı başka bir açıdan görürüz. Onlarca ya da yüzlerce milyon yıl içinde yavaş yavaş değişen değil, hızla gelişen bir gezegendir bu; her yüz bin yıl, bir öncekinden gözle görülür biçimde farklıdır. Bunun nedeni kısmen daha ayrıntılı kalıntılarımızın oluşudur fakat bu aynı zamanda yaşamın doğasıdır. Hayvanlar ve bitkiler, özellikle toprakları sömürgeleştiren yaratıklar Dünya'nın döngülerine hızlı biçimde tepki verir; hızla evrilir ya da ölürler. Eski türler ölürken yerlerini yeni türlere bırakır.

Tüm Dünya Bir Sahnedir

Geride bıraktığımız 550 milyon yıl içinde, yer değiştiren kıtalar Dünya'nın evrimi ve gittikçe çeşitlenen biyotası için değişken bir

ortam sunmayı sürdürmüştür. Öykü ana hatlarıyla iyi anlaşılmıştır; bu üç perdeli oldukça basit bir oyundur.

Birinci Perde: 542 milyon yıl önce, Kambriyen Dönem'in başlangıcında, Rodinia Proterozoik süper kıtası pek çok geniş ve dağınık parçaya ayrılmıştı. Güney Kutbu'ndan Ekvator'un ötesine uzanan en geniş alan, genişleyen Gondvana kıtasıydı; Gondvana, Hindistan'ın jeolojik anlamda açık bir bölgesiydi. Günümüzün güneydeki kıtalarının hepsi, ayrıca Asya'nın büyük bir bölümü, kuzeyden güneye uzaklığı on üç bin kilometreden fazla olan bu tek dev kara parçasında bir araya gelmişti. Tümü Güney Yarımküre'de bulunan diğer Rodinia-sonrası kıtalar arasında (bugünkü Kuzey Amerika ve Grönland'ı oluşturan) Laurentia'nın özü ve (Avrupa'nın büyük bölümünün de dâhil olduğu) başka pek çok büyük ada bulunuyordu. Kuzey Yarımküre'ye, topraktan neredeyse tamamen yoksun küresel bir okyanus hâkimdi. Bunu izleyen 250 milyon yıl içinde, levhalar tüm kıtaları kuzeye doğru hareket ettirdi. Laurentia önce Avrupa'ya dönüşecek olan şeyle, sonrasındaysa Sibirya'nın önemli bir kısmıyla birleşerek boyutunu iki katından daha fazlasına çıkardı.

İkinci Perde: Yaklaşık üç yüz milyon yıl kadar önce kuzey yönünde ilerleyen Gondvana Laurentia'yla birleşerek en yakın döneme ait olan Pangaea süper kıtasını oluşturdu. Gondvana ve Laurentia'nın bu birleşmesinin en olağanüstü jeolojik sonuçlarından biri Kuzey Amerika ve Afrika arasındaki antik denizin kapanmasıydı, bu Apalaş Dağları'nı doğuran bir çarpışmaydı. Bugün Maine'den Georgia'ya kadar uzanan Apalaşlar, görece tehlikesiz, şekilli sıradağlardı. Bu şekilde hafifçe sallanan bir topoğrafya, erozyonun gücüne işaret eder, çünkü üç yüz milyon yıl kadar önce, hâlâ yükselmekte olan çentikli tepeleri altı yedi kilometre yükseğe çıkmış, Dünya tarihindeki en güçlü dağlardan bazıları olarak bugünün Himalayalarıyla rekabet etmiştir. Dörtte üçü Güney Yarımküre'de bulunan orantısız süper kıta, Dünya'daki kurak alanların neredeyse tamamını gezegenin tek bir tarafında yoğunlaştırmıştır. Yüz milyon yıl boyunca, uygun biçimde isimlendirilen süper

okyanus Panthalassa (“tüm denizler”in Yunancası) süper kıtayı çevreliyordu.

Üçüncü Perde: Atlantik Okyanusu, 175 milyon yıl kadar önce, büyük süper kıta kütlesi yedi büyük parçaya bölünmeye başladığında oluşmaya başladı. Önce Laurentia ve Gondvana bölündü ve başlangıç aşamasındaki Kuzey Atlantik’i oluşturdu, bu sırada artan kıtasal bölünme daha da uzağa, kuzeybatı ve güneydoğuya kadar uzanıyordu. Antarktika ve Avustralya Gondvana’dan ayrılarak güneye doğru ilerleyip kendi ada kıtalarını oluşturdular. Güney Amerika’yla Afrika’nın batı yakası arasındaki bir yarıma Güney Atlantik’in oluşumunu başlattı, öte yandan Hindistan Afrika’nın doğu yakasından koptu ve kuzeye doğru 50 milyon yıllık yolculuğuna başladı, nihayetinde Asya’ya çarpacak ve Himalaya Dağları’na çökecekti.

Bu uzun tarihsel süreç boyunca, çeşitli kıtasal oyuncular, bir insan dramından farklı olmayan biçimde etrafta koşuşturdu, ortaklıklar oluşturdu ve ayrıldı. Bu küresel oyunun oynanışını görmenin yardımı olacaktır: bunun için sadece Google’da “süper kıta animasyonları”nı aratın. İzlerken, kayan kıtaların Dünya’ya başka değişiklikler dayattığını hatırlayın. Daha uzun kıyı kesimleri, sığ sularda daha fazla yaşamı destekledi. Kutupsal kara parçaları kalın buz tabakalarının oluşumunu destekledi ve bu tabakalar da nihayetinde deniz seviyesini düşürdü. Yaşam daha geniş kara parçalarında büyük rekabetler içinde ilerledi fakat evrim ayrı kıtalarda ya da birbirinden oldukça ayrı denizlerde bağımsız olarak gelişti. Sıradağların ve okyanusların konumları iklimi değiştirdi. Tarih boyunca, bugün olduğu gibi, Dünya’nın tüm büyük döngüleri, tüm diğer döngüleri etkiledi.

Hayvan Patlaması!

Milyarlarca yıl boyunca, Dünya’daki mikrobik yaşamın boyutu, iklim, beslenme, Güneş ışığı ve farklı etkenler doğrultusunda değişiklik gösterdi. Sığ su tortularından elde edilen yeni kanıtlar, Neoproterozoik Devir’in sonundaki büyük su yosunu oluşumlarının

birkaç geçici yankıdan fazlası olduğunu ortaya koyar. Yeşil fotosentetik su yosunları, bataklıklarda sağlam temeller atabilmek için ilk kez yeni stratejiler geliştirdi; kıtalar sonunda mavi bir okyanusa karşı Mars turuncusundan çok yeşil görünüyordu. Atmosferdeki oksijen yoğunlaşarak yükseldikçe stratosferdeki ozon tabakası (Dünya'nın katı yüzeyini Güneş'in ölümcül ultraviyole ışınlarından etkin biçimde koruyan radyasyon bariyeri) de yükseldi. Bu türden koruyucu bir örtü, sağlam kökler salmış bitkilerin ve özgürce dolaşan hayvanların olduğu canlı karasal bir biyosferin yükselişi için de önemli bir başlangıçtı.

Tuhaf biçimde, hayvan yaşamının karayı bütünüyle doldurması yüz milyon yıl daha aldı. Oldukça uzun bir süre boyunca, biyolojik yeniliklerin büyük bir bölümü Güneş ışığı alan sığ denizlerde gerçekleşti. Çok hücreli denizaneleri ve solucanlar, kırk milyon yıl boyunca buzul çağı sonrası okyanuslarına hâkim olmuş gibi görünüyor. Fosil kalıntılarında nadiren görülen çok sayıdaki yumuşak bedenli hayvan, deniz dibindeki döküntülerle besleniyor ve minerallerin, mikrobik atalarının oluşturduğu girintilerde gizleniyordu. Onlarca milyon yıl boyunca, ekolojik bir süredurum varlığını sürdürmüş görünüyor.

Bu süredurum, kabaca 530 milyon yıl kadar önce çarpıcı evrimsel bir oyunla kalıcı olarak bozulmuştu: Pek çok hayvan türü katı minerallerden koruyucu kabuk üretmeyi öğrendi. Yaşam milyarlarca yıl boyunca resif benzeri stromatolitlerde mineral katmanları biriktirmiş olsa da bu evrimsel gelişmenin nasıl gerçekleştiğinden kimse tam olarak emin değil. 580 milyon yıl önceki Gaskiers buzullaşmasının ardından, bir şekilde, bir yerlerde, bilinmeyen bir hayvan sıradan minerallerden kendi koruyucu kalın parçalarını (sıklıkla kalsiyum karbonat ya da silika) üretmenin muhteşem oyununu geliştirdi. Bu tür bir yenilik hayatta kalma mücadelesinde çok fazla şey ifade ediyordu, çünkü yırtıcı hayvanlar enerjilerini katı mineralleşmiş bir dış iskeleti kırmak için tüketmektense yumuşak bedenli bir parçayı yemeyi tercih ederdi. Bu durum çok geçmeden “kendi kabuğunuzu üretin ya da ölün” hâlini almıştı. Bu sürecin sonunda ortaya çıkan fosil kalıntıları

inanılmaz derecede zengindir ve tortul katmanların canlı gibi görünen kalıntılarıyla kaplandığı (Kambriyen “patlaması” diye adlandırılan) bir döneme işaret eder.

Patlama yanıltıcı bir isimdir. Bu ani bir dönüşüm değildi; “biyomineralleşme”nin anlaşılması milyonlarca yıl aldı. Çin’in güneyindeki Guizhou bölgesinin fosil-yoğun Doushantuo oluşumunda korunan sertleşmiş omurgalı birkaç sünger, oyunu 580 milyon yıl kadar önce öğrenmiş olabilir. Yaklaşık 550 milyon yıl öncesine gelindiğinde, Edikara Dönemi’nin sonunda, solucan benzeri çeşitli yaratıklar, okyanus zemininde karbonatlı mineralleri tüp şeklinde korunaklı evlere dönüştürmeyi öğrenmişti.

Küçük ve kırılgan olmakla birlikte, Dünya’daki ilk kabuklu hayvan topluluğu, yaklaşık 535 milyon yaşındaki kayalarda görüldü. (Boston’un hemen kuzeyindeki Massachusetts sahilinde bulunan Nahant’a, lisans döneminde bu nadir bulunan fosilleri toplamak amacıyla yapılan özel bir eğitim gezisini hatırlıyorum. Canlı deniz havası, açık kayalıklı kıyıya vuran dalgalar, muhteşem beyaz şişkin bulutlar ve mavi okyanus bütünüyle unutulmazdı; çıplak gözle pek görülemeyen bozulmuş artık fosiller için aynı şeyi söylemek pek mümkün değildi.)

Gerçek “patlama” birkaç milyon sonra, kabaca 530 milyon yıl kadar önce, her türden kabuklu hayvan birdenbire ortaya çıktığında gerçekleşti. Bunu evrimsel bir silahlanma yarışı izledi. Tıpkı kemikli koruyucu kaplama ve keskin, savunma amaçlı omurgalar gibi dişler ve çeneler de ortaya çıktı. Yoğun Paleozoik okyanusların acımasız dünyasında gözler zorunlu hâle geldi. Sayısız kabuklu yaratık nesli yaşayıp öldükçe, karbonat biyoiskeletleri, Dünya’nın son yarım milyar yılını asilce süsleyen büyük, dirençli kireç taşı katmanlarına katkı sağladı. Fosil dolu muazzam karbonat uçurumları ve tepeleri yerküreyi kapladı ve Kanada Rocky Dağları’nın en yüksek tepelerini ve çini beyazı Dover falezlerini oluşturarak, hatta Everest Dağı zirvesini kaplayarak düzinelerce ülkede alana hâkim oldu.

Tüm Kambriyen evrimsel yenilikleri arasında, trilobit denilen büyük gözlü deniz yaratıkları en değerli, en fotojenik olanlardır. Bu noktada bir açıklama yapmak gerekli. Ben tribolitleri severim. Tamamlanmaya yakın ilk örneğini, çocukluğumun geçtiği, Cleveland, Ohio'dan uzak olmayan evde, yedi sekiz yaşlarında tamamladım ve o zamandan bu yana onları topluyorum. Artık gizli hazinem tümü Smithsonian'a bağışlanan iki binden fazla parça içeriyor. (En iyi türlerden bazılarını Ulusal Doğa Tarihi Müzesi'ndeki Sant Ocean Holü'nde görebilirsiniz.) Dolayısıyla taraflıyım.

Biyomineralleşmenin ilk yükselişi kademeli olsa da 530 milyon yıl kadar önce, katı parçaların olduğu yaşam birdenbire her yere yayılmış görünüyordu. Her türden uzun bacaklı trilobit ve çizgili istiridye, ceviz benzeri dallı bacaklı ve yelpaze biçimli zarif yosun hayvancığı, gözenekli süngerler ve boynuz biçimli mercanlar yerküre çevresindeki tortul kaya katmanlarında korunur. Montana'dan Fas'a uzanan kayalar boyunca, elinizi bu çarpıcı biyosilah buluşunun gerçek anlamda başladığı somut katmana (tarihin gerçek şeridi üzerine) koyabilirsiniz.

Yumuşak bedenlilerin aniden kabuklu hayvanlara dönüşümü üzerinde çalışılabilecek en etkileyici noktalardan biri, Fas'ın batısındaki Anti-Atlas Dağları'nın manzaralı dağ eteklerindeki tarihi vaha kasabası Tiout'un yakınlarında bulunur. Neredeyse dikey olarak uç noktada bulunan ve Souss Nehri'nin sarp duvarlı vadisinde sergilenen binlerce kilometrelik karbonat tortusu, Edikaran Dönem'in sonunun ve Kambriyen Dönem'in başlangıcının bitimsiz bir kaydını sunar. Art arda dizilen kırmızımsı kahverengi kireç taşı katmanları bilindik fosillerden bütünüyle yoksundur. Yılın büyük bölümünde kuru olan nehrin çakılların dağıldığı yatağında bir kilometre yürüyüp sıradan bir solucan yuvası önerisinden biraz daha fazlasını görebilirsiniz.

Sonra birdenbire, kasabanın üzerindeki bir yamaçtaki bir kireç taşı katmanında (uzaktan bakıldığında, yukarıdakilerden ya da aşağıdakilerden hiç farklı görünmeyen bir ufukta) fosiller ortaya çıkar. Belki de tüm trilobitlerin ilki olan antik *Eofallotaspis*, Kambriyen patlamanın başlangıcına işaret eder. Tarihsel tabakaların

biraz daha üzerinde bulunan (yani daha genç olan) katmanlarda, yeni türler bulunur: *Choubertella* ve *Daguinaspis*'in farklı, eliptik, altı santim uzunluğundaki formları. İkinci tür bugüne dek en sık görülen türdür fakat en üretken ve erişilebilir çıkıntılardan biri, bir aziz mezarlığının, kutsal bir Müslüman mabedinin tam ortasında yer alır. Yuvarlak kubbeli küçük beyaz yapıyı, trilobitlerle dolu alçak taş bir duvar çevreler. Ziyaretçi jeologlar için mekânın sessizliğini bozacak biçimde çekiçe vurmak ve oymak uygun olmayacaktır. Ancak bölgede yaşayan çocuklar istisna gibi görünür ve arabanızın penceresine vurarak ve yeni gün yüzüne çıkarılmış eşyaları yukarı kaldırarak turistlere “Tiout¹⁰ malları”nı satarlar.

“Hey bayım, yüz dirhem!” Yaklaşık on iki dolar.

Pazarlık etmem. Hepsini alırım.

Görüntünün Değişmesi

Uzun yıllar boyunca fosil toplarken böceklerle odaklıydım. Bir kayayı kırarak ikiye ayırmanın ve içinde bütün olarak bir trilobit bulmanın heyecanını abartıyor olmak güçtür. Balıkçılar büyük bir balık yakaladıklarında, poker oynayanların şansı yaver gittiğinde benzer bir keyif alıyor olmalılar; bu benim için beş yüz milyon yıldır saklı olan muhteşem bir hayvan bulmaktır.

Yıllar boyunca av yeterliydi. Sonra, 1970 yılının baharında son sınıfta bir lisans öğrencisiyken, saygıdeğer Robert Shrock'tan ilk gerçek paleontoloji dersimi aldım. Bob Shrock, yaklaşık kırk yıl boyunca Massachusetts Teknoloji Enstitüsü'nde ders vermiş ve İkinci Dünya Savaşı'nı izleyen yaklaşık yirmi yıl boyunca, Massachusetts Teknoloji Enstitüsü jeoloji ve jeofizik bölümlerinin başkanlığını yapmıştı. Alanda bir devdi ve belki de en başta *Index Fossils of North America* olmak üzere sayısız klasik yayını vardı; *Index Fossils of North America* Kambriyen patlamasından bu yana her jeolojik dönemde, karakteristik türlerin büyük, fotoğraflı bir incelemesiydi.

10 Fas'ta bulunan küçük bir kasaba.

Robert Shrock kibar bir gülümsemesi olan yetenekli bir öğretmendi, derslerini mizahla ve mesleğine duyduğu bitimsiz tutkuyla dolduran doğal bir yetenektir. Geçmiş zamanların canlı öykülerini anlatarak, babacan bir tavırla öğretmenlik yapıyordu. Yüz yıl kadar önce British Columbia’da, benzersiz yumuşak bedenli fosilleri Stephen Jay Gould’un *Wonderful Life*’ıyla ünlenen 505 milyon yıllık bir bölgede, Burgess kil taşının şans eseri at sırtında keşfedilişinden söz etti. Küçük kurbağaların sevimli fosillerinin, Nova Scotia’nın batı yakasında, Joggins’te bulunan 300 milyon yaşındaki ağaç kökü kalıntılarındaki içindeki ince taneli siltte nasıl korunduğunu betimledi (küçük kurbağalar oyuk kütüklerin içine zıplamış ama dışarıya zıplayamamıştı). 90 milyon yıl önce, geniş bir iç denizin (canavar sürüngenlerin ve mürekkep balığı ammonitlerin üstünlük için yarıştığı bir denizin) bugün Amerika’nın Orta Batı’sının Büyük Ovalar’ını kapladığı dönemin canlı resimlerini çizdi.

Tuhaf biçimde, (o dönemde Wellesley Üniversitesi’nde son sınıf öğrencisi olan) karım Margee ve ben Bob Shrock’ın son iki öğrencisi olduk. 1970 yılı baharında, Vietnam Savaşı’na karşı öğrenci protestoları öfkeli bir hâl aldı; dersler aksadı ve mallar tahrip edildi. Her yere nüfuz eden dikkat dağıtıcı unsurlar göz önünde bulundurulduğunda, Massachusetts Teknoloji Enstitüsü yönetimi öğrencilere “geçti-kaldı” derslerini alma, dolayısıyla final sınavlarını atlama seçeneğini sundu. Margee ve ben paleontoloji alanında derece almayı seçen iki öğrenciydik. Kademeli olarak bir hafta boyunca yürütülen yorucu final sınavımızın amacı yüz fosil arasında bilinmeyen tüm türleri tespit etmek ve sonrasında *türü elimizle çizmektir*. Doğadan yararlanmak kesinlikle gözlemsel becerileri geliştirmenin harika bir yoludur fakat ben bir sanatçı değildim. Kurşun kalemle çizilen her şema mini bir kâbustu; sonsuz zaman alıyor ve hatırlayabildiğimden çok daha fazla bilgi kullanmamı gerektiriyordu.

Bu, Bob Shrock’un son paleontoloji sınıfıydı. 1965 yılında, seçkin sismolog Frank Press’in yeni bölüm başkanı olarak gelişi, denetlemenin değişiminin ve jeolojiye daha niteliksel ve fizik temelli bir yaklaşıma hızlı bir geçişin dönüm noktasını oluşturmuştu. Levha

tektoniğinin kıtalar gibi müfredatı da değiştirdiği bu modern dünyada elle çizilen fosillere hiçbir şekilde yer yoktu.

Margee ile birlikte bu son dersten feyz alarak pek çok hafta sonunu fosillerin yoğun olduğu yerlerin yakınlarında kamp yaparak geçirdik. Bunu izleyen birkaç yıl içinde Massachusetts'in güneyinde fosil eğretili otları, Pennsylvania'nın kuzeydoğusunda mercanlar, New York'un doğusunda dallı bacaklılar ve Vermont'un kuzeybatısında trilobitler topladık. Shrock'un dersi bize bu fosilleri yeni bir bağlamda görmeyi öğretmişti. Her kaya türü ve her fosil grubu farklı antik ekosistemlerin bir öyküsünü anlatıyordu.

Herhangi bir dönemde, her biri farklı bir yerde ve su derinliğinde pek çok farklı türde kaya (farklı fasiyesler) oluşturduğunu öğrendik. Kum taşları sahile en yakın yerde, sert, sık gelgit kuşaklarında oluşur. Güçlü fosil istiridye popülasyonları ve şiddetli dalgalara dayanabilen kalın kabuklu salyangozlar içerirler. Buna karşılık kireç taşı antik mercan kayalıklarını temsil eder ve bu yüzden de zengin bir hayvan yaşamı düzenine (saplı denizlaleleri, deniz yıldızları, salyangozlar, dallı bacaklılar ve korunaklı aydınlık bir lagünde gelişen diğer gruplara) ev sahipliği yapar. Resif ekosistemlerinden pek çok zarif trilobit çevrelerini bütün olarak 360 derece tarayabilen büyük gözlere sahip olma eğilimindedir. Daha da açıklarda, siyah kil taşları derin karanlık suda yavaş yavaş birikir; her iki fauna da süzücüler ve kör trilobitler (daha sık, ışığın ulaşabildiği derinliklerde bulunanlardan oldukça farklı hayvanlar) içerir.

Şayet her çıkıntı belirli bir zaman ve mekânın resmini çiziyorsa, üst üste yığılan bir dizi kaya katmanı zengin bir değişim öyküsü anlatmaktadır. Özellikle katmanlı kaya türlerinin dramatik dizilimleri, sıklıkla ekonomik değeri olan (dolayısıyla iyi incelenmiş) kömür tortularıyla ilişkili olarak gerçekleşir. Üç yüz milyon yıl önce, bataklıkların olduğu kıyı bölgelerinde bol miktarda oluşan kömür, genel olarak kum taşı tabakaları arasında sıkışmış olarak oluşur ve bu tabakalar da kil taşıyla sınırlandırılır. Bu türden bir dizilim –kil taşı, kum taşı, kömür ve tekrar kil taşı- muhtemelen kutuplardaki buz örtüsünün ve buzulların geri çekilmesine ve ilerlemesine cevaben düşen, sonra yükselen, sonra yine düşen

deniz seviyelerinde gözle görülür kaymalara işaret eder. Okyanus derinliklerinin yüzlerce milyon yıl boyunca tekrar tekrar yüzlerce kilometre çeşitlilik göstermesi kaçınılmaz bir sonuçtur.

Modern insanlara göre, uçsuz bucaksız kıyı kentlerimiz ve geniş deniz kıyısı alt yapımızla okyanusların yüksekliği (en azından gelgitlerin alçalıp yükselmesi dâhilinde) yerkürenin sabit bir yönü gibi görünür. Yüzlerce metrelik değişiklik bir yana, üç metrelik bir değişikliği bile hayal etmek güçtür. Fakat son dönemdeki tortul kalıntılar bu noktada belirsizliğe yer vermez. Geride bıraktığımız on binlerce yıl içinde, okyanuslar bugüne kıyasla 45 metreden daha yüksek ve 90 metreden daha alçak seviyelerde olmuştur. Olası herhangi bir şüpheye yer bırakmayacak biçimde, bu tür değişiklikler yeniden kıtasal kıyıların biçimlerini radikal ölçüde değiştirecektir. Kayaların ve onların fosil ekosistemlerinin anlattığı öykü işte böyledir.

Karada Hayat

Dünya tarihindeki en dramatik karasal dönüşüm için kara bitkilerinin yükselişinin (475 milyon yaşındaki kayalarda, farklı, güçlü mikroskobik fosil sporları olarak geçen bir yeniliğin) beklenmesi gerekmiştir. Henüz o dönemden kalan narin, kolaylıkla aşınan beden fosillerinden hiçbiri bulunmamış olmasına karşın, o ilk gerçek bitkiler muhtemelen modern kıızıyapraklardan (yeşil su yosunlarının yalnızca alçak, sulak yerlerde yaşayabilen o köksüz, toprağa sarılan soylarından) farklı değildi. 40 milyon yıldan uzun bir süre boyunca, dünya çapındaki karasal kaya oluşumlarında, çürümeye dayanıklı sporlar kara bitkilerinin biricik fiziksel kanıtlarıdır. Bu zorlu yeşil öncülerin evrimi düzenli fakat ağır olmuş gibi görünüyor.

Yaklaşık 430 milyon yıl kadar önce, spor fosillerinin küresel çeşitliliğinde oluşan gözle görülür değişiklik, kara bitkilerinin dağılımında bariz bir kaymaya işaret eder. Bunu izleyen 30 milyon yıl içinde, kıızıyaprak benzeri sporlar daha az görülmüş, öte yandan modern yosunlara benzeyenler ve basit damarlı bitkiler

hâkimiyet kurmuştur. Bu ara döneme ait İskoçya, Bolivya, Çin ve Avustralya'dan gelen kayalar, aynı zamanda bitkilerin kendilerinin bilinen en eski şüpheyeye yer bırakmayan fosillerini içerir; bunlar kurtayaklarının ve modern damarlı bitkilerin (bir iç boru tesisatına sahip su dolu tüpleri olanlar) kuşkulanılan diğer akrobalarının parçalı kalıntılarıdır. Kapsamlı kök sistemlerinden yoksun olan bu kısa, güdük bitkiler deniz seviyesine yakın, sulak bölgelerle sınırlandırılmıştı.

Fosil kalıntıları, zaman içinde, ilk bitkiler daha da yayıldıkça ve güçlendikçe gelişir. Dört yüz milyon yıl öncesine erişildiğinde, ilkel damarlı bitkiler yerküre çapında bir zamanlar çıplak olan toprakları kolonileştirmeye başlamıştı. Yeşilimsi, Güneş arayan fotosentetik kökleri ve dalları yerden yalnızca birkaç santimetre yüksekte olan uzun, yapraksız, minyatür çalılara benziyorlardı. Kökleri kayalık zemine etkin biçimde nüfuz ederek güçlü bir köprü oluştururken kılcal hareket suyu yukarıya yayıyordu.

Yaşamın toprağı kolonileştirmesindeki gözle görülür önemlerine karşın, fosilleşmiş bitkiler uzun süre trilobitlerin ve dinazorların gölgesinde kalmıştır. Hayvanların avcı ve av olarak daha dinamik yaşam tarzları vardır, biçimleri ve davranışları (bize daha çok benzeyen şekilde) daha değişken görünür. Dahası fosil bitkiler parçalı olma eğilimindedir; tipik olarak tek başına bir yaprak ya da kök, bir kabuk parçası ya da tanımlanmış numune odun. Bitkiler, Chicago Üniversitesi'nden paleobotanikçi Kevin Boyce'un "istiridyelerin tatmin edici bütünlüğü" diye adlandırdığı şeyden yoksundur fakat yine de inanılmaz öyküler anlatırlar.

Kevin'le ilk kez 2000 yılında, Andy Knoll'la çalışan ve bu öyküleri Dünya'nın en eski fosil bitkilerinden bazılarından çıkarmanın yeni yolları hakkında düşünen heyecanlı ve yaratıcı bir lisansüstü öğrencisiyken tanıştım. Tam bir kitap kurdu ve yetenekli bir yazar olan Kevin öykü anlatmakta oldukça becerikli, o bitkilerin tarihini büyüleyici hâle getirebilen bir bilim insanıydı. Fakat Kevin, Dünya'nın en eski bitkilerine ilişkin yeni öyküler anlatabilmek için bitki fosilleriyle ilgili yeni veri türlerine ihtiyaç duyuyordu. Andy Kevin'i elementlerin, izotopların ve moleküllerin

mikro analitik teknikleri (daha önce fosilleşmiş bitkilere sistematik olarak hiç uygulanmamış bitkiler) hakkında bir şeyler öğrenebilmesi için Jeofizik Laboratuvarı'na gönderdi.

İlk ortak araştırma girişimi Aberdeenshire, İskoçya'da, dört yüz milyon yaşındaki Rhynie çörtünde bulunan, gözle görülür biçimde korunmuş bitki fosillerine odaklanıyordu. Kaplıcalar dokularını mineral-yoğun sularla çevrelediğinde ve gömülü bitki maddesini hava geçirmeyecek biçimde sızdırmaz hâle getirerek bu maddenin yerine ince kumlu silikayı yerleştirdiğinde, şanslı Rhynie bitki örtüsü çürümekten kurtuldu. Jeologlar yüz yıl kadar önce, küçük Rhynie kasabasındaki taş bir çitte, çörtün iri parçalarını keşfetti. Ancak yapılan hatırı sayılır ölçüde kazıdan sonra, gerçek ana kayanın küçük bir bölümü bulundu ve çıkarıldı. Rhynie çörtü türleri hâlâ değerli ve bulunması oldukça güç türler olma özelliklerini koruyor fakat Kevin Boyce, bitki anatomisinin hücresel ayrıntılarına kadar bir mikroskopla incelenemediği, yumruk boyutunda türlerin ve ince, cam montajlı, beş santimetreye yedi santimetre boyutlarında şeffaf, perdahlı kayaların bulunduğu eski bir Harvard koleksiyonuna erişti. Bu fosiller tuhaf kara parçalarını açığa çıkarır, bunlar aynı zamanda hem tanıdık hem oldukça yabancı, her biri yeşil fotosentetik köklere sahip olmakla birlikte hiçbir yaprağı olmayan sap benzeri kollara ayrılan bitkilerle kaplıdır.

Onlarca yıl önce, Rhynie bitki fosillerinden bilgi edinme çabası kelimenin tam anlamıyla kahramancaydı. Her biri üç boyutlu karmaşık bir objenin iki boyutlu bir görünümünü sunan yüzlerce ince dilimin hazırlanmasını gerektiriyordu. Sevdiğiniz bir çiçeği aldığınızı, onu sert, ışık geçirmez bir epoksiye daldırdığınızı ve daha sonra epoksiyi düz dilimler şeklinde keserek ve bütünü yeniden birleştirerek çiçeğin şeklini yeniden oluşturmaya çalıştığınızı hayal edin. Öncü Rhynie paleobotanikçilerinin yapmaya çalıştığı buydu. Buldukları tuhaf, ince, yapraksız bitkilerden oluşan minyatür bir grup, yeşil Dünya'mızın atalarıydı.

Kevin Boyce, Dünya'nın antik florasına ilişkin yeni bilgileri açıklığa kavuşturabilmek için Rhynie çörtüne yeniden gitmeye karar verdi. Stratejisi kabaca bir çeyrek doların boyut ve biçimine

sahip olan Rhynie fosillerinin yeni kesilmiş ve cilalanmış bölümlerini analiz etmekte. Bir elektron mikropubu, çörtün cam montajı yapılmış bölümleri gibi, kimyasal elementlerin cilalı kaya bir yüzey üzerindeki dağılımını ayrıntılarıyla gösteren (madenciliklerin aşına olduğu, fakat paleontologların nadiren kullandığı) bir makine kullanmaya başladık. Özgün bitki materyallerinin herhangi bir kısmının korunup korunmadığını görmeyi umuyorduk. İşin sırrı mikropubu karbona, yaşamda katı kayalarda olduğundan daha fazla görülen bir elemente dönüştürmekteydi. Rhynie çört fosillerinin karbonla (ve üstelik biyolojik kökeninin ikna edici bir göstergesi olan izotopik açıdan hafif karbonla) dolu olduğunu görmek bizi memnun etti. Karbon dağılımı, bu ilk damarlı bitkilerin farklı borulu yapılarını gereğince vurgular. Rhynie’de bulunan yabansı kökler ve bitki sporları da dâhil, çeşitli antik bitki fosillerinin hücresel boyuttaki haritalandırmasına ilişkin ilk yazımız, 2001 yılında, Ulusal Bilimler Akademisi’nin *Proceedings*’inde yer aldı.

Kevin’in bir sonraki adımı, fosillerden herhangi bir biyomoleküler bilgi elde edip edemediğini görmektir. Özgün bitki dokularında gerçek moleküler parçalar bulabilir miydik? Kevin Boyce, dört yüz milyon yıl önce, Dünya’da yaşadığı bilinen en büyük şey olan, *Prototaxites* denilen, 7,6 metre uzunluğunda ağaç benzeri gizemli bir organizmaya odaklandı. Bu organizmanın fosilleri anlaşılmalıdır, çünkü bir arada yaşayan çok daha küçük bitkilerin hücresel yapılarından yoksun görünürler. Daha çok, “gövdeleri” karmaşık biçimde iç içe geçmiş borulara benzeyen yapılardan oluşmuş gibi görünür. Jeofizik Laboratuvarı’ndan meslektaşlarım Marilyn Fogel ve George Cody ile çalışan Boyce, çeşitli *Prototaxites* türlerinden, belirsizliğe yer vermeyen moleküler parçaları (bunlar yakındaki bitki fosillerinden oldukça farklı parçalardı) çıkararak analiz edebildi. Vardığı kayda değer sonuç şuydu: *Prototaxites* dev bir mantar, belki de Dünya tarihindeki en büyük şapkalı mantardı.

Kevin Boyce’un araştırması paleobotanik topluluğun elde ettiği sonuçları güçlendirir. Dünya’nın dört yüz milyon yıl önceki görünümü nihayet yeşil olmuştu fakat oldukça tuhaf biçimde. Çelimsiz,

çöp benzeri bitkiler karayı yükselen ağaç benzeri mantarlarla ve birkaç küçük böcek ve örümceğe benzer hayvanla paylaşıyordu.

Yaprakların Oluşumu

Dört yüz milyon yıl önce, Dünya'da oldukça rahat biçimde varlığınızı sürdürebilirdiniz. Çokça oksijen ve su vardı. Bitki ve böcek formunda yiyecekler vardı. *Prototaxites*'in dev kanatlarının altı korunaklıydı. Fakat bölge oldukça tuhaf görünüyordu. Yeşil kökler ve yeşil dallar vardı, ama kesinlikle hiç yaprak yoktu.

Gerçekten de enerjiyi hapseden ilk küçük yaprakların ortaya çıkışı onlarca milyon yıl ya da daha fazla sürdü; bu bitki krallığının Güneş ışığı için evrimsel mücadelesinde işleri ciddiye bindiren dönüştürücü bir gelişmeydi. En büyük yaprakları olan en uzun bitki bir avantaja sahipti ve böylelikle yelpaze benzeri eğrelti otları, kollara ayrılan dallar ve güçlü odunsu gövdeler oluştu. 360 milyon yıl öncesine gelindiğinde, oldukça yeni bir karasal ekosistem olarak ormanlar ortaya çıkmıştı. Tarihte ilk kez, Dünya zümrüt yeşiliydi.

Sürekli tekrarlanan bir temada, Dünya bu yeni taze yaşamla birlikte geliyordu. Bazıları ağaca benzer dev bir yapıya sahip olan hızla yayılan kara bitkilerinin yükselişinin büyük mineralojik sonuçları oldu. Bazalt, granit ve kireç taşının da dâhil olduğu pek çok yüzey kayasının aşınma oranları, köklerinin ve onların hızlı biyokimyasal çöküşünün bir sonucu olarak, boyutları doğrultusunda arttı. Bunun sonucunda ortaya çıkan, kil mineralleri, organik madde ve pek çok mikroorganizmanın yoğun olarak bulunduğu topraklar daha derin ve yaygın hâle geldi ve daha fazla ve daha büyük bitki ve mantarlara gittikçe genişleyen bir yaşam ortamı sundu.

Kök sistemleri, ortadan kalkmış olmasına rağmen gözle görülür biçimlerde gelişmişti. İçlerinden en önemlileri bitki kökleri arasındaki yeni sembiyotik ilişkiler ve kök mantar denilen geniş mantar telciği ağlarıydı. Bu şaşırtıcı evrimsel strateji bugün gördüğünüz bitkilerin büyük bölümünü etkiler; gerçekten de pek çok bitki mantar sporlarından yoksun olan topraklarda zayıf biçimde

büyüme eğilimindedir. Kök mantarlar fosfat ve diğer besinleri topraktan etkin biçimde çıkarır ve bunu bitkiye aktarır ve bitki de mantarlara enerji-yoğun glikoz ve diğer karbonhidratlarla düzenli bir beslenme düzeni sağlar. Bu yer altı geometrisini hayal etmek güçtür fakat bir ağaç köklerinin ve yerin altındaki mantarsı telciklerin geniş ağı, oldukça sık biçimde, zemin üzerinde gördüğümüz ağaçtan çok daha büyüktür.

Yenilebilir bitkiler Dünya'ya yayıldıkça, hayvanlar da büyük evrimsel gelişmeler göstermiştir. Omurgasız hayvanlar -böcekler, örümcekler, solucanlar ve diğer küçük yaratıklar- karadaki ilk kâşiflerdi. İlk kez yaklaşık 500 milyon yıl önce ilkel çenesiz balıklar şeklinde görülen omurgalılar, kurak alanları kolonize etme yönündeki ilk kararsız girişimlerinden önce, okyanuslarda 100 milyon yıldan uzun süreli bir evrim geçirmiştir. Kemikli çeneleri olan yırtıcı, yabancı görünümlü zırhlı balık 420 milyon yıl önce ortaya çıktı; çok daha bilindik kıkırdaklı köpekbalıkları ve kemikli balıklar bunu izleyen 20 milyon yıl içinde görüldü ve çeşitlendi. Fakat kurak bölge omurgalılarından oldukça yoksundu.

395 milyon yaşındaki fosil balık kemiklerinin yakın zamanda Çin'de keşfedilmesi, yüzgeçlerden dört ayaklı kara hayvanlarına evrimsel geçişin ilk işaretlerini sundu. Balıklar en az 20 milyon yıl boyunca sığ, bazen kuru kıyı çevresinde bolca vakit geçirdi. Birkaç balık ilkel ciğerler geliştirdi ve karada gittikçe daha uzun süreler boyunca kaldı fakat ilk kemikli hayvanın nefes alarak kendisini bütünüyle evinde hissetmesi için milyonlarca yılın geçmesi gerekti. Dört ayaklı bir kara hayvanının, kanada benzeyen ayaklarıyla yürüyen bir balığın bilinen en eski fosil kemikleri, yaklaşık 375 milyon yaşındaki kayalardan gelir.

Balıktan amfibik hayvana kademeli geçiş son yirmi yıl içinde giderek daha fazla belirginleşti; bu Çin'den Pennsylvania'ya muhteşem paleontolojik keşiflerin verimli bir dönemi idi. Yeni fosil bulguları ara formların 30 milyon yıllık bir ara dönemine işaret eder, bunlar karaya gittikçe daha fazla uyumlanmış fakat gözle görülür biçimde balığa benzeyen anatomik özellikleri hâlâ korumaktadır. İlk gerçek amfibikler yaklaşık 340 milyon yıl önce Karbonifer

Dönemi denilen, bataklık ormanlarının dünya çapındaki deniz seviyesine yakın bölgelerde geliştiği dönemde ortaya çıkmıştır. Geniş, düz kafataslarıyla öne çıkan, taraklı bacakları, beş parmaklı ayakları, açık havada dinlemeye uygun kulakları ve başka karasal uyumlanmaları olan bu ilkel kara hayvanları, balık atalarından gözle görülür biçimde farklıydı. Karbonifer Dönem'e gelindiğinde, Dünya'nın katı yüzeyi, uzun eğrelti otu benzeri ağaçlardan oluşan sık yeşil ormanları, rutubetli bataklıkları ve gittikçe artan böcek, amfibi ve diğer yaratıklarla ilk kez oldukça modern bir görünüme bürünmüştü. Yaşamın yoğun etkisi sayesinde de Dünya'nın yüzeye yakın kaya ve mineralleri de modern çeşitlilik ve dağılım durumlarına yakın bir yer edinmişti.

Gerçi Dünya'nın durağanlığa yaklaşmış olması gibi bir durum söz konusu değildir. İklimler güçlenip zayıflamış, kuraklık ve seller toprağa baskı yapmış ve tuhaf asteroid etkisi ve süper volkan püskürmeleri, yaşamda benzerlerini hiçbir zaman görmeyi ummayacağımız hasarlara yol açmıştır. Yaşam her zaman bugünün gerçekliğine uymanın bir yolunu bulur; bugün denilen her ne anlama geliyorsa.

Üçüncü Büyük Oksitlenme Olayı

300 milyon yıl öncesine erişildiğinde, Dünya'da ormanlar artıyordu. Gerçekten de o kadar çok sayıda yapraklı biyokütle üretiliyor ve gömülüyordu ki yeni bir kaya türü olan karbon-yoğun siyah kömür (dolayısıyla Karbonifer Dönemi) ölü bitkilerin kalın kütlelerinin basınçla birlikte ısınmasıyla oluşmaya başladı. Bu organik karbon inzivasının sonuçlarından biri, tıpkı önceki Neoprezozoik oksitlenme olayında olduğu gibi, atmosferde yeni bir oksijen artışının gerçekleşmiş olmasıydı. Oksijenin artışı, 380 milyon yıl önceki kabaca yüzde on sekizlik orandan 300 milyon yıl önce gözle görülür yüzde otuz ya da daha fazla bir orana kadar kademeliydi. Gerçekten de bazı tahminlere göre atmosferdeki oksijen oranı kabaca yüzde otuz beşten fazlaydı, bu günümüzdeki seviyelerin oldukça üzerinde bir rakamdı. Bu uç noktadaki figürler de

bütünüyle tahminden ibaret değildir: Karbonifer Dönemi'nin güzel türleri amber, fosilleşmiş ağaç reçinesi, hâlâ yüzde otuz ya da daha fazla oranda oksijenin bulunduğu antik atmosfer kabarcıkları içerir gibi görünür.

Oksijen artışının hayvan yaşamı için faydalı sonuçları olmuştur. Daha fazla oksijen daha fazla enerji ve artan hayvan metabolizması oranları anlamına geliyordu. Bazı yaratıklar bu aşırı canlılıktan daha fazla (çok daha fazla) büyüyerek fayda sağladı. İçlerinden en çarpıcı olanları dev böceklerdi, örneğin iki ayaklı kanat genişlikleri olan canavar helikopter böcekleri. Artan oksijen aynı zamanda atmosfer yoğunluğunu da arttırdı ve uçmayı ve süzülmeyi çok daha kolay hâle getirdi. Diğer hayvanlar da kuşkusuz artık soluyabildikleri ağırlaşan havayla geçmişte yaşama elverişsiz olan daha yüksek noktalara göçtü.

Onlarca milyon yıllık bir süre boyunca süper kıtadaki yaşam gelişti. İklim yumuşaktı, bol miktarda kaynak vardı ve yaşam coşkuyla evriliyordu. Fakat sonra oldukça ani ve esrarengiz biçimde, bundan 251 milyon yıl kadar önce, Dünya'daki en felaket yok oluş olayıyla yaşam son buldu.

Büyük Ölüm ve Diğer Kitleli Yok Oluşlar

Geride bıraktığımız 540 milyon yıl içinde, fosil kalıntılar birikti. Bu çok sayıdaki biyolojik buluşa işaret eder; çok sayıda farklı mikroskobik hayvan bir yana, mercan ve denizlalelerinin, dallı bacaklılar ve yosun hayvancıklarının, istiridye ve salyangozların bilinen yüz binlerce fosil türü. Uzmanlar her yıl tanımlanan düzinelerce yeni türle birlikte, trilobitlerin bilinen yirmi bin türünün artışında çeşitlilik olacağını öngörür. Trilobitlerin Dünya'da yalnızca yaklaşık 180 milyon yıl boyunca (yaklaşık 430 ila 250 milyon yıl öncesi arasında) var olduğu göz önünde bulundurulursa bu, ortalama birkaç bin yılda bir yeni bir trilobit türünün ortaya çıkması anlamına gelir. Fosil yaşamının tüm zengin çeşitliliği dikkate alındığında, 500 milyon yıldan uzun bir süre boyunca ortalama her yüz yılda pek çok yeni tür ortaya çıkmış olmalıdır.

Fosil kalıntılarına bakılarak hemen anlaşılamayan şey, kitlesel ölümün birkaç şiddetli evresi, milyonlarca türün aniden yok oluşudur. Yeni bir şeyi fark etmek görece kolaydır ve paleontologlar, dikkat çekici bir sınıf ya da özelliğin “ilk” ya da “en erken” görünümünü betimlemenin cazibesine karşı kayıtsız değildir. İlk bitki, ilk amfibi, ilk hamam böceği ve (küçük işlevsiz arka bacaklarıyla da olsa) ilk yılan bütün olarak fosil haberlerini oluşturmuştur. Hatta son dönemde çıkan bir yazıda Dünya’nın (dört yüz milyon yaşında bir örümceğe ait) bilinen en eski fosil penisinin (Rhynie çörtünden çıkarılan bir diğer önemli bulgunun) keşfi ilan edilmiştir.

Kaybın fosil kalıntılarında görülmesi daha güçtür. Yok oluşlar, fosil çeşitliliğinin yerküre çapında katmanlar, zaman aralıkları boyunca özenli biçimde incelenmesini gerektirir. Onlarca yıl süren çaba, beş büyük kitlesel yok oluşun (geride bıraktığımız 540 milyon yıl içinde yeryüzünün türlerinin yarısından fazlasını kaybettiği beş korkunç dönemin) belgelendirilmesiyle karşılık bulmuştur. Daha fazla veri biriktikçe, on beş ya da daha az sayıda yoğun kitlesel yok oluş evresi de olmuş olabileceği görülür.

Türlerin aniden yok oluşunun fosil kalıntıları doğrultusunda belgelenmesi kolay değildir. Okyanuslardaki pek çok yükselme ve çekilme, sığ denizlerin açılma ve kapanması, soğuk dönemlerde çökelmenin yavaşlaması ve erozyona bağlı geri dönüşü olmayan kayıplar göz önünde bulundurulduğunda, kaya kalıntıları, tıpkı bütün olarak birkaç bölümü yok olan ve pek çok sayfası rastlantısal biçimde koparılan bir ansiklopedi gibi düzensiz ve eksiktir. Yanı sıra, katmanların kesin yaşlarını tespit etmek ve oluşumların yerkürenin zıt noktalarındaki zamanlamalarını eşleştirmek sıklıkla güçtür. Dolayısıyla herhangi bir hayvan grubunun yok oluşu basit biçimde kalıntılarda uzun bir boşluğu yansıtabilir. Bununla beraber, fosil verileri arttıkça ve dünya çapındaki paleontologlar notları karşılaştırdıkça, en büyük yok oluş olayları yaşam ve ölümün normal arka planı karşısında öne çıkma eğilimindedir.

Paleozoik Devir’in 251 milyon yıl önce son bulmasıyla, en büyük kitlesel yok oluşa tanıklık edildi. Tahminen kara türlerinin yüzde yetmişi ve deniz canlılarının yüzde doksan altısı yok oldu;

bu, Büyük Ölüm denilen korkunç bir küresel olaydı. Dünya tarihinde bu dönemden önce ya da bu dönemden bu yana (tüm tribolitlerin de dâhil olduğu) çok sayıda yaratığın sonsuza dek yok olduğu hiçbir durum yaşanmadı.

Bilim insanları Büyük Ölüm'e neyin yol açmış olduğu konusunda henüz hemfikir değil. Bu kesinlikle dev bir asteroid darbesi gibi tek bir basit neden değildi; tek bir seferde de gerçekleşmedi. Gerçekten de çok sayıda zorlayıcı baskı unsuru devreye girmiş olabilir. Öncelikle, oksijen seviyeleri Karbonifer Dönem'deki yüzde otuz beşlerden hızla düşmeye başlamıştı; 251 milyon yıl öncesine gelindiğinde, yeniden kabaca yüzde yirmilik orana erişmişlerdi. Bu karmaşık hayvan yaşamını desteklemek için yeterli bir oksijen oranıdır fakat bu düşüş muhtemelen daha yoğun, talep-kâr, yüksek oksijen metabolizmalarına uyumlanmış olan hayvanları daha fazla strese sokmuştur. Paleozoik Devir'in sonunda aynı zamanda küresel bir soğuma evresi ve sade bir buzul çağı yaşanmış, kalın buz tabakası süper kıtanın Güney Kutbu'ndaki bölgeleri kaplamıştır. Sonunda okyanus seviyelerinde görülen büyük düşüş Dünya'nın kıta sahanlıklarının büyük bölümünü açığa çıkararak yeni baskılar oluşturmıştır. Kıta sahanlıkları okyanusun en üretken biyosferidir, dolayısıyla bu sığ kıyı bölgelerinin büyük bölümünün kaybı mercan kayalıklarının ve diğer çeşitli sığ su ekosistemlerinin büyümesini sınırlandıracak, bütün bir okyanus gıda ağını kısıtlayacaktı.

Paleozoik Devir'in sonundaki, 251 milyon yıl öncesinin kitle-sel yok oluşuyla neredeyse tam olarak kesişen geniş çaplı volkanik faaliyetler, Dünya'nın biyosferinde bir diğer büyük bozulmayı (jeosferin biyosfer üzerinde bir diğer etkisini) temsil eder. Sibirya'daki bir milyon kilometreküplük bu uzun süreli devasa püskürme, Dünya tarihindeki volkanik olayların en büyüklerinden biri, Dünya çevresiyle büyük bir uyum göstermiş olmalıdır. Yüzbinlerce yıl boyunca, volkanik kül ve toz yığınları Güneş'in etkisini azalttı ve oluşabilecek herhangi bir buzul çağını şiddetlendirdi. Bol miktardaki zehirli sülfür bileşenlerinin salınımı asit yağmurlarıyla ve başka çevresel bozulmalarla sonuçlanacaktı.

Sanki tüm bu çevresel hasarlar yeterli değilmiş gibi, bazı bilim insanları, Dünya'nın en büyük kitlesel yok oluşunda bir diğer olası baskı unsuru olarak ozon tabakasının çöküşüne işaret eder. Antarktika'dan Grönland'a kadar dünya çapındaki Paleozoik Devir sonu kayalarından çıkarılan mutasyona uğramış fosil sporları somut deliller oluşturmada da merak uyandıran kanıtlar sunar. Belki de Sibirya kaynaklı volkanik salınımlar, atmosferin üst tabakalarında ozon tabakasını yok eden ve mutasyona yol açan ultraviyole radyasyonu oluşturan kimyasal reaksiyonları tetiklemiştir.

Nedenleri ne olursa olsun, Büyük Ölüm Dünya'nın biyoçeşitliliğinde sarsıcı bir boşluk oluşturmıştır. İyileşme otuz milyon yıl sürmüş fakat gerçekleşmiştir. Her yok oluş olayından sonra tekrarlanan bir temada kayıplar fırsatla sonuçlanmıştır. Yeni bir çağ olan Mezozoik Dönem yeni bir fauna ve floranın gelişimine ve boşlukları doldurmasına tanıklık etmiştir.

Dinozorlar!

Başarılı bir yayıncı bir keresinde bana çok fazla bilimsel kitap satmak istiyorsam iki popüler konudan biri hakkında yazmam gerektiğini söyledi: Karadelikler ya da dinozorlar. (Hatta yayıncı karadeliklerle hiçbir ilgisi olmayan kitaplarımdan birinin başlığına "karadelikler" ifadesini dâhil edecek kadar ileri gitti.)

İşte böyle. Dinozorlar bundan yaklaşık 230 milyon yıl önce Paleozoik dönemin sonundaki kitlesel yok oluştan fayda sağlayan varlıklar olarak ortaya çıktı. Bu büyüleyici sürüngenler başlangıçta yavaş ve küçüktü fakat 160 milyon yıldan uzun bir zaman dilimi içinde çeşitlenerek her ekolojik noktaya yayıldılar. Büyük Ölüm'den sonra bir dönem dinozorlar büyük amfibilerle yan yana rekabet etti fakat bir başka büyük volkanik evreyle kesişen 205 milyon yıl öncesine ait bir diğer kitlesel yok oluş, dinozor olmayan omurgalıların büyük bölümünü ortadan kaldırdı. Bunu bir dinozor patlaması izledi.

Dinozorlar Mezozoik Dönem faunasının en dikkat çekici ve karizmatik türüdür. Bugüne dek o dönemden kalan fosiller arasında

en sık görülenler ammonitler denilen zarif biçimde sarılmış deniz kafadanbacaklılarıdır. Tribolit-yoğun Paleozoik kayaların bulunduğu ortamda büyümemiş, Güney Dakota'nın tribolit-yoğun Mezozoik topraklarında yetişmiş olsaydım, muhtemelen ammonitler toplardım. Kabukları spiral simetrileri ve parıltılı yüzleriyle şaşırtıcı derecede güzel. Bu bölümlenmiş kafadanbacaklılar, odacıklı notilusun uzaktan ataları, bir zamanlar her iç hazneyi bir diğerinden ayırmış olan zarif kabuk süslemeleri içerir. Ammonit kabukları trilobitlerden farklı olarak bütün olarak hayvanların gerçekçi bir resmini sunamaz. Büyük gözleri ve on yapışkan dokunacıyla fırlayan büyük kafa, uzun süre önce çürümüştür. Geriye kalan sadece çok daha ilginç bir yaratığın koruyucu zırhlı evidir. Ammonitler 160 milyon yıl boyunca Mezozoik denizlerde evrildi ve çeşitlendiler.

Mezozoik Dönem'de başka pek çok önemli biyolojik gelişme yaşandı. Çiçeklenen bitkiler ilk kez o zaman görüldü. İlk gerçek memeliler de öyle. Dünya tarihinin diğer tüm önemli bölümleri için geçerli olduğu gibi, coğrafya ve topoğrafyada canlı Dünya'daki bu gelişmeleri destekleyecek pek çok değişiklik oldu. Süper kıta bölünmeye başladı ve Atlantik Okyanusu doğdu. Atmosferdeki oksijen seviyeleri tehlikeli biçimde yüzde on beşlik bir orana düştü ve daha sonra kabaca bugünkü yüzde yirmi birlik orana yükseldi. Mezozoik zamanda gözle görülür herhangi bir buzullaşmanın hiçbir kanıtı (Paleozoik zamanı sonlandıran buzul çağıyla rekabet edecek bir şey dahi olmasa da) deniz seviyeleri tekrar tekrar yükselip alçaldı.

Bundan 65 milyon yıl önce Dünya tarihindeki en kötü günlerden biri yaşanmıştır. Yaklaşık dokuz kilometre çapında olduğu tahmin edilen bir asteroid bugün Yucatán Yarımadası olan bölgede Dünya ile çarpışmıştır. Epik bir mega tsunami yerküreyi sarmış, bunu kıtalar boyunca yanan büyük yangınlar izlemiştir. Buharlaşan kayaların oluşturduğu devasa bulutlar göğü karartmış ve fotosentezi neredeyse sonlandırmıştır. Bu kozmik travma hâlihazırda risk altında olan bir dünyada gerçekleşmiş gibi görünüyor. Paleozoik zamanın sonundaki kitlesel yok oluşun bir tekrarında,

Hindistan'daki büyük bir volkanik püskürmeler serisi, hâlihazırda Dünya'nın atmosferini değiştiriyor ve yüzbinlerce yıldır ekosistemlerini zayıflatıyor olabilir. Bir diğer evrede, deniz seviyesindeki gözle görülür bir düşüş, okyanusun besin zincirini bozarak ve binlerce ammonit arasında bilinen sekiz tür dışında tümünü öldürerek yaklaşık olarak bu dönemde kıta sahanlığının büyük bölümünü açığa çıkarmış görünüyor. Bu türden bir deniz seviyesi değişikliğinin nedenleri hiçbir şekilde açık değildir çünkü o dönemde bir buzul çağı yoktu. Bazı bilim insanları okyanus ortası sırtlarının daha az aktif hâle gelerek soğumaya, küçülmeye ve bunun sonucunda tüm okyanus zemininin çökmesine neden olduğu yorumunu yapar.

Gerekçeler ne olursa olsun, bireysel ya da toplu olarak tek bir küçük soy (kuşlar) dışında tüm dinozorlar yok oldu. Ammonitlerin sonuncusunun da soyu tükendi. Evrimleşen memelilerin yolu çizilmişti. Bu küçük, kemirgen benzeri omurgalılar daha büyük (dolayısıyla talihsiz) dinozor akrabalarının yanında yerlerini sağlamlaştırmış ve Mezozoik zaman sonunda soylarının devam etmesi onlara neredeyse her ekolojik ortamda dayanak sağlamıştır. Hint mega yanardağını ve rastlantısal asteroid darbelerini izleyen on milyon yıl içinde memeliler çeşitlenmişti; on beş milyon yıl içinde, balinaların, yarasaların, atların ve fillerin ilk ataları gelişmişti.

Böylelikle kitlesel yok oluşlar Dünya'daki yaşamı tekrar tekrar hiçe saydı ve savurdu. Son 540 milyon yıl içinde bu gelgitler tekrar tekrar görüldü. Peki ya daha önceki dönemler? 540 milyon yıl öncesinden önceki dönemde hiçbir kitlesel yok oluş yaşanmamış mıydı? Paleontologlar bu noktada takılmıştır. Kambriyen Dönem patlamasından önce, kayda geçecek neredeyse hiç tanılayıcı fosil yoktur. Yok oluşun istatistikleri dinozorlar ve tribolitler gibi farklı organizmaların önemli sayıda olmasını gerektirir; 540 milyon yıl öncesinden önce, bunlar basit biçimde yoktur. Mikrobik yaşam, benzer hasar ve tür kaybı dönemleri yaşamış mıdır? Dünya'nın önemli bölümlerini verimsizleştiren dev asteroid darbeleri ve yıkıcı volkanik aktivite dönemleri olmuş olmalı. Elbette yaşam kartopu Dünya evrelerinde, muhtemelen daha önceki buzullaşma

evrelerinde de oldukça zorlanmıştı. Yaşamın doğuşuna kadar uzanan yüzlerce kitlesel yok oluş gerçekleşmiş olabilirdi. Fakat kusurlu, mikroskobik Prekambriyen fosil kalıntılarına bakarak bunu hiçbir zaman bilemeyiz.

İnsan Çağı

Dünya'nın mevcudiyet süresinin yüzde 99,9'undan fazlası boyunca, insan yoktu. Gezegenimizin tarihinde göz açıp kapayana kadar geçen bir zaman kadar varız.

Homo sapiens'in yakın dönemdeki yükselişinin izi, 65 milyon yıl öncesinin o arsız, Manhattan boyutundaki asteroidine kadar sürülebilir. Dinozorların ölümünü izleyen birkaç milyon yıl içinde, memeliler boş ekolojik ortamlara, tarla ve ormanlara, dağ ve çöllere, hava ve okyanuslara yayılmıştı. Böyleyken dahi, geride bıraktığımız 65 milyon yıl kolay geçmedi. Bu tuhaf ve güzel yeni memelilerin büyük bölümü 56, 37 ve 34 milyon yıl kadar önce diğer kitlesel yok oluşlarla, henüz belirsiz olan nedenlerden öldüler.

İnsanlar nihayetinde bu felaketlerin sonuncusunda, hayatta kalanlardan türedi. Maymunlar, büyük insansı maymunlar ve biz yaklaşık 30 milyon yıl önceki ortak bir primat atadan geliyoruz. İlk insansılar, dik yürüyen primatları içeren evrimsel aile, muhtemelen 8 milyon yıl kadar önce, Afrika'nın ortasında ortaya çıktı.

Bu arada, yaklaşık yirmi milyon yıl önce başlamış olan buzlaşmanın yeniden canlanışının yoğunluğu ve sıklığı arttı. Muhtemelen geride bıraktığımız üç milyon yıl içinde sekiz ayrı zamanda, buz kutuplardan yüksek enlemlerin geniş bölümlerini kapsayacak biçimde yayıldı ve üst Orta Batı kadar uç bir güney noktaya erişti. Daha önceki kartopu Dünya evreleri kadar uç noktada olmasa da tekrarlanan bu buzul çağlarının her birine deniz seviyesinde yüzlerce metrelik sert düşüşler eşlik ediyordu. Buz köprüleri Asya ve Kuzey Amerika'yı birbirine bağlıyor, mamutlar ve mastodonlar dâhil her türden memelinin ve nihayetinde insanların Yeni Dünya'ya göçüne olanak sağlıyordu.

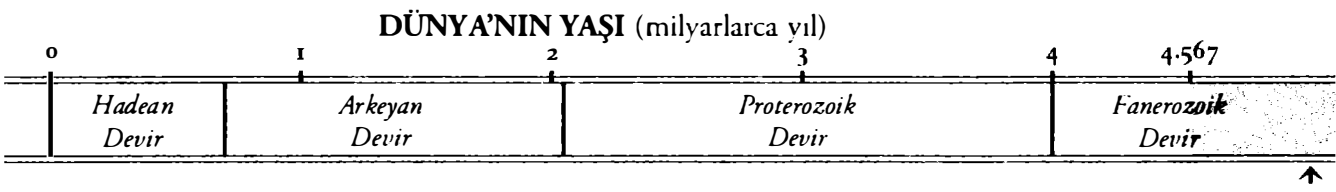
Bu buzul çağları bir diğer şaşırtıcı evrimsel dönüşe yol açmış olabilir. İlginç kuramlardan birine göre, soğuk havalar annelerine daha uzun süre yakın kalan çocukların, yanı sıra daha büyük kafalı çocukların (kafa ne kadar büyük olursa ısı kaybı da o kadar düşük olur) hayatta kalmasına yardımcı olmaktadır. Büyük kafalar büyük beyinler anlamına gelir, öte yandan anneyle geçirilen daha fazla zaman öğrenmeye ayrılan daha fazla zaman demektir. Belki de ilk insan olan *Homo habilis*'in ya da “alet yapan insan”ın bu büyük buzullaşmalardan kısa süre sonra, 2,5 milyon yıl önce ortaya çıkmış olması bir tesadüf değildir.

Araya giren binyıllık dönemde, tekrarlanan değişime katlanan ve uyumlanan insan türü oldu. Sıra dışı ölçüde ılık “interglasiyal” dönemleri izleyen kutup bölgesi buz ilerlemeleri, kuraklıkları izleyen seller, denizlerdeki büyük çekilmeleri izleyen eşit ölçüde büyük ilerlemeler: Bu tür döngüler büyük oranda bağışlayıcı ölçüde kademeliydi, pek çok nesle yayılıyordu ve göçebe insanların ilerlemek ve hayatta kalmak için çok fazla zamanı vardı. Bu tür uyumlanmalar, yalnızca değişebilen Dünya’ya cevap veren en yakın zamana ait örnekler arasında bulunur.

Gerçekten de Dünya tarihinin son yarım milyar yılında yaşam ve kayalar arasındaki en şaşırtıcı etkileşim -teknolojik insan çağında bir intikamla devam eden bir ortak evrim- görülmüştür. Çağlar öncesinde kayalar, su ve hava yaşamı oluşturmuştur. Bunun sonucunda yaşam da atmosferi nefes alınması güvenli ve toprağı yeşil ve üzerinde hareket edilmesi güvenli bir yer hâline getirmiştir. Hayat nihayetinde, kayaları yaşamı daha fazla besleyen ve gittikçe genişleyen bir flora ve fauna yelpazesi olan topraklara dönüştürmüştür.

Dünya tarihi boyunca, hava, denizler, toprak ve yaşam, Dünya’nın dönüştürücü güçleriyle biçimlenmiştir: Güneş ışığının gücü ve Dünya’nın iç ısı, suyun büyü, karbon ve oksijenin kimyasal gücü ve yer kabuğunun derin iç bölgesinin bitimsiz ısı yayımı ve bunun sonucunda yer kabuğunda depremler yoluyla sürekli parçalanmalar,

volkanlar ve sürekli kayan kıtasal levhalar. Bu güçlerin ortasında, türümüz dirençli, zeki ve uyumlu olduğunu kanıtlamıştır. Dünyamızı kendi istediğimiz gibi biçimlendirebilmek için teknolojik oyunlar öğrendik: Metallerini kazıp çıkarıyor ve şekillendiriyor, nehirlerinin yönünü değiştiriyor ve kaynaklarından faydalıyor, fosil yakıtlarını çıkarıyor ve yakıyoruz. Eylemlerimiz sonuçsuz değil. Her gün, gezegen evimizin dinamik süreçlerine uyumlanacak olursa, iç içe geçmiş yaratıcı güçlerinin her yönünü deneyimleyebiliriz. Ancak bu şekilde Dünya'nın nasıl müthiş biçimde değişken olabildiğini ve geçici arzularımıza karşı son derece kayıtsız olduğunu anlayabiliriz.



Gelecek

Değişen Dünya Senaryoları

Dünya'nın Yaşı: Gelecekteki 5 milyar yıl

Geçmiş geleceğin girizgâhı mıdır? Dünya için cevap hem evet hem de hayırdır.

Geçmişte olduğu gibi Dünya aralıksız değişim şablonlarının gezegeni olmayı sürdürecektir. Hava tekrar tekrar önce daha sıcak, sonra daha soğuk olacaktır. Tropik aşırılıklar gibi buzul çağları da geri dönecektir. Levha tektoniği varlığını sürdürecektir, okyanusları açıp kapatırken kıtaları karıştıracaktır. Dev asteroid darbeleri ve mega volkanlar bir kez daha yaşamın akışını aksatacaktır.

Fakat diğer değişiklikler yeni olacak ve pek çoğu ilk granit kabuğu kadar değiştirilemez olacaktır. Yaşayan çok sayıda türün soyu tükenecek ve bir daha asla görülmeyeceklerdir. Kaplanlar, kutup ayıları, kambur balinalar, pandalar, gorillerin tümü tehlike altındadır. İnsanların da soyunun tükenme ihtimali oldukça yüksektir.

Dünya tarihinin pek çok ayrıntısı büyük oranda bilinmemekte, belki de bilinemezdir. Fakat gezegenimizin doğal yasalarla birleşen zengin tarihi, bize gelecekte olacaklarla ilgili bir tahmin yürütme şansı verir. Şimdi uzun vadeyle başlayalım ve sonrasında modern zamanlara gittikçe daha fazla odaklanalım.

Oyun Sonu: Bugünden Beş Milyar Yıl Sonra

Dünya kaçınılmaz ölümüne giden yolu neredeyse yarlamıştır. 4,5 milyar yıl boyunca, Güneş sürekli parlamış, geniş hidrojen yakıtı

deposunu “yakarken” zaman içinde biraz daha parlak hâle gelmiştir. Beş milyar yıl (aşağı yukarı) süre daha, Güneş hidrojeni helyuma dönüştürerek nükleer enerji oluşturmayı sürdürecektir. Pek çok yıldızın çoğu zaman yaptığı budur.

Nihayetinde hidrojen tükenecektir. Bu aşamaya erişen daha küçük bazı yıldızlar sadece yavaşça yok olur, geçmişte olduğundan çok daha az enerji gönderirken boyutları da küçülür. Güneş bu türden bir “kırmızı cüce” yıldız olsaydı, Dünya’nın nihai kaderi kaskatı donmak olurdu. Yaşam, herhangi bir şekilde varlığını sürdürseydi yer altının derinliklerindeki, suyun var olabildiği birkaç dayanıklı mikropla sınırlı olurdu.

Ancak Güneş böyle acınası bir şekilde ölmeyecektir, çünkü nükleer bir yedek plana sahip olacak kadar büyüktür. Her yıldızın iki karşıt kuvveti dengelemek zorunda olduğunu hatırlayın. Bir yandan, yerçekimi olabildiğince küçük bir küre oluşturmak için yıldızın kütlesini içine çeker. Öte yandan, nükleer reaksiyonlar bitimsiz bir içsel hidrojen bombası dizilimi gibi dışarıya doğru iter ve yıldızı daha büyük hâle getirmeye çalışır. Güneş, mevcut görkemli hidrojen yakımı aşamasında, yaklaşık 1.400.000 kilometrelik sabit bir çapa erişmiştir; bu 4,5 milyar yıl boyunca varlığını sürdürmüş olan ve 5 milyar yıl daha sürdürecektir olan bir boyuttur.

Güneş, hidrojen yakım aşaması nihayetinde son bulduğunda, yeni, çılginca enerjik bir helyum yakma aşamasının başlayacağı ölçüde büyüktür. Hidrojen füzyon reaksiyonlarının yan ürünü olan helyum, karbon elementini ortaya çıkaracak biçimde diğer helyum atomlarıyla birleşebilir fakat Güneş’e ilişkin bu yeni stratejinin içindeki gezegenler için felaket getiren sonuçları olacaktır. Güneş, daha enerjik helyum reaksiyonlarından ötürü, aşırı ısınmış çılgin bir balon gibi gittikçe daha fazla büyüyecek, titreşimli, kırmızı dev bir yıldızla dönüşecektir. Küçük Merkür’ün yörüngesini kaplayacak, minik gezegeni yutacaktır. Komşumuz Venüs’ün yörüngesini kaplayacak, o kardeş dünyayı da yutacaktır. Mevcut çapının (hatta Dünya yörüngesinin) yüz katından daha fazla büyüyecektir.

Dünya'da oyunun sonunun net ayrıntıları belirsizdir. Bazı kötü senaryolara göre, kırmızı dev Güneş, basitçe Dünya'yı yutacak, Dünya ise solar atmosferde buharlaşacak ve artık var olmayacaktır. Diğer modellerde Güneş akıl almaz Güneş rüzgârlarıyla mevcut kütlelerinin üçte birden fazlasını kaybeder; bu da Dünya'nın ölü yüzeyini durmaksızın kavuracaktır. Güneş daha az yığınsal hâle geldikçe Dünya'nın yörüngesi dışa doğru hareket edecektir, belki yutulmayı engellemeye yetecek ölçüde. Fakat genişleyen Güneş bizi yutmasa bile bir zamanların güzel mavi Dünya'sından bize kalan yalnızca oldukça çorak, kendi yörüngesinde dönen bir köz olacaktır. Seyrek yüzey altı mikrobik ekosistemleri bir milyar yıl daha direnebilir fakat toprak hiçbir zaman yeniden verimli ve yeşil olmayacaktır.

Çöl Dünya: Günümüzden İki Milyar Yıl Sonrası

Güneş oldukça yavaş biçimde, mevcut durgun hidrojen yakma durumunda dahi daha sıcak hâle gelmektedir. Başlangıçta, bundan 4,5 milyar yıl kadar önce, Güneş mevcut ışığının yaklaşık yüzde yetmişiyle parıldıyordu. 2,4 milyar yıl önceki Büyük Oksitlenme Olayı'nda Güneş'in bugünkü yoğunluğunun muhtemelen yüzde seksen beşi oranında parladığı görüldü. Bugünden bir milyar yıl sonra da Güneş hâlâ parlak olacak.

Bir dönem için, belki yüzlerce milyon yıl boyunca, Dünya'nın geri bildirimleri değişimi yönlendirebilir. Daha fazla ısı daha fazla buharlaşma anlamına gelir, bu da daha fazla bulut üretir ve bulutlar da daha fazla Güneş ışığını uzaya geri yansıtır. Daha fazla ısı, kayaların daha fazla karbondioksit tüketecek, dolayısıyla sera gazlarının oranını azaltacak biçimde daha hızlı aşınması anlamına gelir. Dolayısıyla olumsuz geri bildirim döngüleri Dünya'yı uzun süre yaşanılır durumda tutabilir.

Fakat bir taşma noktası olacaktır. Daha küçük olan Mars, bu kritik döneme, milyarlarca yıl önce, neredeyse tüm yüzey suları kaybolduğunda erişmiştir. Önümüzdeki bir milyar yıl içinde de Dünya'nın okyanusları ürkütücü derecede buharlaşmaya başlamış

ve atmosfer kalıcı bir sauna hâline gelmiş olacaktır. Kutuplar bile tropik bölgelere dönüşeceğinden hiçbir buz tabakası ya da buzul kalmayacaktır. Milyonlarca yıllık bir zaman diliminde, yaşam bu türden bir sera ortamında gelişebilir. Fakat Güneş ısınmaya devam ettikçe ve atmosfere daha fazla su buharı girdikçe, hidrojen uzayda gittikçe artan oranlarda kaybolacak ve gezegen yavaş yavaş kuruyacaktır. Tüm okyanuslar kuruduğunda, muhtemelen iki milyar yıl içinde, Dünya çorak ve kavrulmuş, yaşam tehlikede olacaktır.

Novopangaea ya da Amasia: Bundan 250 Milyon Yıl Sonra

Dünya'nın ölümü kaçınılmazdır fakat çok çok çok uzaktadır. Daha az uzak bir geleceğe yönelik tasarımlar, dinamik olmakla beraber görece güvenli bir gezegenin daha iyicil bir resmini çizer. Birkaç milyon yıl ileriye bakıldığında geçmiş, gerçekten de geleceğin anlaşılmasında temel unsurdur.

Levha tektoniği Dünya'nın değişiminde temel bir rol oynamayı sürdürecektir. Bugün kıtalar dağınık durumdadır. Engin okyanuslar Kuzey ve Güney Amerika'yı, Avrasya ve Afrika'yı, Avustralya ve Antarktika'yı birbirinden ayırmaktadır. Fakat bu kıtalar, kabaca yılda üç ya da altı santimetre oranlarında -her 60 milyon yılda bin altı yüz kilometre olmak üzere- sürekli hareket hâlinindedir. Okyanus zemini bazaltlarının yaşları üzerinde çalışarak, her kıta için oldukça kesin vektörler oluşturabiliriz. Okyanus ortası yakınlarındaki bazalt oldukça genç, en fazla birkaç milyon yaşındadır. Buna karşılık kıtasal sınırlardaki ve dalma kuşaklarındaki bazaltın yaşı 200 milyondan fazla olabilir. Tüm bu okyanus zemini yaşlarını çıkarmak, levha tektoniği kasetini zamanda geriye doğru sarmak ve geride bıraktığımız 200 milyon yıl içinde, Dünya'nın değişen kıtasal coğrafyasının bir anlık görüntüsünü edinmek oldukça basit bir konudur. Bu bilgiden yola çıkılarak makul levha hareketlerini 100 milyon yıldan uzun vadeli bir geleceğe yansıtmak da mümkün olabilir.

Yerküre çapındaki mevcut yörüngeleri göz önünde bulundurulduğunda, tüm kıtalar bir başka çarpışmaya hazırlanıyor görünür.

Yaklaşık çeyrek milyar yıl içinde, Dünya topraklarının büyük bir bölümü bir kez daha dev bir süper kıtayı (bazı öngörülü jeologların hâlihazırda Novopangea diye adlandırdığı bir toprak parçasını) oluşturacaktır. Ancak bu geleceğin net düzenlemesi hâlâ bir tartışma konusudur.

Novopangaea'yı bir araya getirmek alengirli bir oyundur. Bugünün kıtasal hareketlerinden yola çıkarak gelecekteki on ya da yirmi milyon yılı öngörmek kolaydır. Atlantik yüzlerce kilometre genişlemiş, öte yandan Pasifik eşit ölçüde küçülmüş olacaktır. Avustralya kuzeye, Güney Asya'ya doğru ilerlemiş ve Antarktika Güney Kutbu'ndan biraz uzağa, yine Güney Asya yönüne kaymış olacaktır. Afrika da hareket hâlinindedir ve Akdeniz'i kapatacak biçimde kuzeye doğru ağır ağır ilerlemektedir. Birkaç on milyon yıl içinde, Akdeniz'i kapatma ve Alpleri gölgede bırakacak olan Himalayalar boyutunda sıradağları yükseltme sürecinde, Afrika, Avrupa'nın güneyiyle çarpışmış olacaktır. Dolayısıyla Dünya'nın yirmi milyon yıl sonraki haritası tanıdık fakat çarpık görünecektir. Bu şekilde, yüz milyon yıl sonrasına bakmak oldukça güvenlidir ve pek çok modelleyici, Atlantik Okyanusu'nun, Dünya'daki en büyük su kütlesi olarak Pasifik'i geride bıraktığı bir dünyanın benzer coğrafyalarına erişir.

Bu noktadan sonra modeller çeşitlenir. Dışadönüm denilen bir düşünce okulunda, Atlantik'in açılmaya devam edeceği ve Kuzey ve Güney Amerika'nın nihayetinde Asya, Avustralya ve Antarktika'yı ezeceği varsayılır. Bu süper kıta birleşiminin sonraki evrelerinde, Kuzey Amerika Pasifik'i kapatacak ve Japonya'ya çarpacak biçimde doğudan akın ederken Güney Amerika ekvatorial Antarktika'ya sokulacak biçimde saat yönünde güneydoğudan çevreler. Tüm parçaların uyum içinde bir araya gelir görünmesi şaşırtıcıdır. Novopangea, Ekvator boyunca doğudan batıya uzanan büyük bir toprak parçası olarak tasarlanır.

Bu dışadönüklük görüşünün temel varsayımı, levha hareketlerinin altında yatan büyük manto ısıyayım hücrelerinin az çok bugünkü gibi olmayı sürdürecektir. İçedönüklük denilen alternatif bakış açısı, Atlantik Okyanusu'nun açılış ve kapanışının geçmişteki

döngülerine başvurarak ters yöne sapar. Geçmiş bir milyar yılın yeniden yapılandırmaları Atlantik'in (ya da batıda Kuzey ve Güney Amerika ve doğuda Avrupa artı Afrika'nın arasında konumlanan eş değer bir okyanusun) birkaç milyon yıllık bir döngüde üç kez açılıp kapandığını ortaya koyar. Kaya kalıntıları, bundan yaklaşık 600 milyon yıl önce, Laurentia ve diğer kıtaların hareketlerinin, Atlantik'in (Atlas'ın babası Yunan Titan'ı Iapetus'un adının verildiği) Iapetus Okyanusu denilen öncelini oluşturduğunu açığa çıkarır. Iapetus Okyanusu Pangaea'nın birleşmesiyle kapanmıştır. 175 milyon yıl önce bu süper kıta ayrılmaya başladığında, Atlantik Okyanusu oluşmuştur.

İçedönüklük taraftarlarına göre (onlar için içedönük demek muhtemelen en iyisi olacaktır) hâlâ genişleyen Atlantik aynı şablonu izleyecektir. Yaklaşık 100 milyon yıl içinde yavaşlayacak, duracak ve ters yöne dönecektir. Daha sonra, bundan yaklaşık 200 milyon yıl sonrasında, Kuzey ve Güney Amerika bir kez daha Avrupa ve Afrika'yla çarpışacaktır. Aynı zamanda, Avusturalya ve Antarktika, gelecekteki "Amasia" süper kıtasını tamamlayacak biçimde Güneydoğu Asya'ya bağlanmış olacaktır. Yanlamasına bir *L* biçiminde olan bu büyük kara parçası, Novopangea ile aynı yapboz parçalarını kullanır fakat bu kez Kuzey ve Güney Amerika batı tarafını oluşturmaktadır.

Şu an için, hem dışadönüklük hem de içedönüklük, yani her iki süper kıta modeli de bir dayanağa sahip görünür ve hâlâ aktif rol oynamaktadır. Bu arkadaşça tartışmanın sonucu ne olursa olsun, herkes Dünya'nın bugünden 250 milyon yıl sonraki coğrafyasının, bugünkünden çarpıcı ölçüde farklı olmakla birlikte, geçmiş zamanları çağrıştıracığı konusunda hemfikirdir. Kıtaların Ekvator bölgesindeki geçici toplanışı, buzul çağlarının etkilerini azaltacak ve deniz seviyelerindeki değişiklikleri düzenleyecektir. Hava ve bitki örtüsü şablonları değişirken ve atmosferdeki karbondioksit ve oksijen seviyeleri dalgalanırken, kıtaların çarpıştığı yerlerde dağlar yükselecektir. Bu tür değişiklikler Dünya'nın öyküsünün merkezinde olmayı sürdürecektir.

Darbe: Gelecekteki 50 milyon Yıl

İnsanların en yüksek ihtimalle ne şekilde ölebileceğine ilişkin yakın zamanda yapılan bir araştırmada, asteroid darbelerinin oranı oldukça düşük (yaklaşık 100.000’de bir) çıkmıştır. Bu istatistiksel olarak yıldırım düşmesi ya da tsunami sonucunda ölümle yaklaşık aynı oranda ihtimal dâhilindedir. Fakat bu tahmini karşılaştırmada gözle görülür bir kusur vardır. Yıldırım düşmesi sonucunda yaklaşık yılda altmış kez tek seferde bir kişi ölür. Buna karşılık asteroid darbeleri, muhtemelen binlerce yıldır kimseyi öldürmemiştir. Fakat gerçekten kötü bir günde, küçük bir darbe neredeyse herkesi tek seferde öldürebilir.

Endişelenmenize gerek yoktur, gelecekteki yüz nesilden herhangi birinin de endişelenmesini gerektirecek bir durum olmaması ihtimali yüksektir. Fakat dinazor öldüren türde bir diğer büyük darbenin, bir gün, bir yerden geleceğinden mutlak biçimde emin olabiliriz. Gelecekteki elli milyon yıl içinde Dünya en az bir büyük darbeden, belki daha fazlasından mustarip olacaktır. Bu bütünüyle bir zaman ve ihtimal sorunudur. Suçlu olma ihtimali en yüksek olanlar Dünya’yla kesişen asteroidler denilen tür; Dünya’nın Güneş çevresindeki daha dairesel rotasının düzlemini kesen oldukça eliptik yörüngelere sahip objelerdir. Bu potansiyel katillerden en az üç yüzü bilinmektedir ve gelecekteki birkaç on yıl içinde bazıları rahatsız edici ölçüde yakından geçecektir. 22 Şubat 1995’te, 1995 CR ismine sahip yeni keşfedilmiş uysal bir asteroid, Dünya’yla Ay arasındaki uzaklığın birkaç katı kadar bir uzaklıktan geçmiştir. 29 Eylül 2004’te, asteroid Toutais, 2,5 ila 5 kilometre uzunluğunda bir obje daha da yakından geçmiştir. 2029 yılında da, 275 metre çapında bir kaya olan asteroid Apophis’in çok daha yakından, Ay yörüngesinin oldukça içinden geçeceği öngörülmektedir. Bu rahatsızlık verici karşılaşma Apophis yörüngesini geri dönüşü olmayacak biçimde değiştirecek ve muhtemelen gelecekte daha da yakına getirecektir.

Dünya’yla kesiştiği bilinen her asteroide karşılık, muhtemelen henüz saptanmamış bir düzine ya da daha fazla asteroid vardır. Bu

cisimlerden biri sonunda gözlemlendiğinde de muhtemelen bize bu konuda pek bir şey yapamayacağımız kadar yakın olacaktır. Şayet hedefin merkezindeyse her şeyi yoluna koymak için yalnızca birkaç günümüz olabilir. İstatistik, olasılıkların öyküsünü anlatır. Dünya'ya, neredeyse her yıl 7,6 metre uzunluğunda bir kaya çarpar. Atmosferimizin frenleme etkileri sayesinde bu tür füzele- rin büyük bölümü yüzeye çarpmadan önce patlar ve küçük par- çalara ayrılır. Fakat otuz metre ya da daha fazla genişlikte, yak- laşık bin yılda bir gelen objeler gözle görülür bir bölgesel zarara neden olur: 1908 yılının Haziran ayında, Rusya'daki Tunguska Ir- mağı'nın yakınlarında bir ormanlık alanda bu türden bir çarpma gerçekleşmiştir. Yaklaşık bir kilometre çapında oldukça tehlikeli kayalar, ortalama yarım milyon yılda bir çarpar, öte yandan çap- ları yaklaşık beş kilometre olan asteroidler yaklaşık olarak on mil- yon yılda bir kez gelebilir.

Bir darbenin sonuçları, darbenin boyut ve yerine göre değişik- lik gösterecektir. On altı kilometre çapındaki büyük bir kaya par- çası yaklaşık olarak çarptığı her yerde yerküreyi tahrip edecektir. (Buna karşılık, 65 milyon yıl öncesinin dinozor öldüren asteroidi- nin çapının yaklaşık on kilometre olduğu tahmin edilir.) Şayet on altı kilometrelik bir obje okyanuslara çarpacak olursa (ki kara ve denizlerin dağılımı göz önünde bulundurulduğunda bu yüzde yet- miş oranında bir ihtimaldir) Dünya'nın en yüksek dağ zirvelerinin neredeyse tamamı yerküreyi yok eden dev dalgalarla temizlene- cektir. Deniz seviyesinden bin metre yükseklikte hiçbir şey hayatta kalmayacak, tüm sahil kentleri tamamen ortadan kaybolacaktır.

Bu türden on altı kilometrelik bir asteroid karaya çarpacak olursa, ani yıkım daha sınırlı olabilir. Bin altı yüz kilometre dâ- hilindeki her şey yok olacak ve büyük yangınlar talihsiz bir kıtayı hedef alarak yok edecektir. Daha uzaktaki kara parçaları kısa bir süre için şiddetten korunabilir fakat bu türden bir darbe, kaya ve toprağın geniş çaplı niteliklerini buharlaştıracak, Güneş'i giz- leyen bulutları bir yıl ya da daha uzun süreliğine atmosferin üst katmanlarına gönderecektir. Fotosentez neredeyse sonlanacak- tır. Bitki yaşamı tahrip edilecek ve besin zinciri çökecektir. Birkaç

insan bu kâbustan sağ çıkabilir fakat bildiğimiz hâliyle medeniyet yok edilmiş olacaktır.

Daha küçük çarpmalar daha az ölüme yol açacaktır fakat yüz metreden uzun her asteroid, ister kayaya ister denize çarpsın, bugüne dek bildiğimiz herhangi bir felaketten daha büyük bir doğal felakete sebep olacaktır. Peki, ne yapılmalıdır? Çok daha fazla sayıda acil çözüm bekleyen sorunun olduğu bir dünyada tehdit çok uzak, çok önemsiz oluşu gerekçesiyle göz ardı mı edilmelidir?

Merhum Carl Sagan, geride bıraktığımız yarım yüzyıl içinde, bilimin belki de en karizmatik ve etkili sözcüsü, asteroidler hakkında çok fazla düşünmüştür. Toplumsal alanda ve özelde, en ünlü olduğu efsanevi TV dizisi *Cosmos*'ta, ortak uluslararası eylemi savunmuştur. 1178 yılı yazında Ay'ın şiddetli patlamasına (bin yıldan daha kısa bir süre önce bize oldukça yakın olan bir asteroid darbesine) tanıklık eden Canterbury Katedrali keşişlerinin canlı öyküsünü anlatarak zemini hazırlamıştır. Bu türden bir darbe Dünya'da gerçekleşmiş olsaydı milyonlarca insan ölürdü. "Dünya geniş bir kozmik alanda oldukça küçük bir sahnedir," der. "Yardının başka bir yerden geleceğine ilişkin hiçbir ipucu yoktur."

Bu türden bir olayı engellemenin en basit ilk adımı, düşmanı tanımak için olabildiğince dikkatli biçimde Dünya'yla kesişen o güvenilmez yok edicileri aramaktır. Dünya'yla kesişen cisimlerin yerini tespit etmek, yörüngelerini belirlemek ve gelecekte izleyecekleri yolu öngörebilmek için dijital işlemcilerle otomatikleştirilmiş özel teleskoplara gereksinimimiz vardır. Bu türden bir çaba görece ucuz ve hâlihazırda yürürlüktedir. Daha fazlası da yapılabilir ama en azından çaba gösterilmektedir.

Peki ya birkaç yıl içinde bize çarpması beklenen büyük bir kaya bulsaydık? Sagan'a göre, hem bilimsel hem de askeri topluluklardaki diğer stratejilerin yanı sıra, asteroid sapması da bariz bir stratejidir. Yeterince erken bir evrede başlatılmış olsaydı bir roket motorunun küçük bir dokunuşu ya da iyi yerleştirilmiş birkaç nükleer patlama dahi bir asteroidin yörüngesini bir çarpışma rotasını kıl payı atlatmaya çevirebilirdi. Bu türden nihai

bir gerekliliğin güçlü bir uzay keşif programı oluşturmak için yeterli bir neden olduğunu iddia ediyordu. 1993 yılına ait öngörülü bir yazıda, Sagan, “Asteroid ve kuyruklu yıldızlardan gelen tehlikeler tüm galaksideki üzerinde yaşanan gezegenler için geçerli olması gerektiğinden, her yerde görülen bu türden zeki varlıkların evlerini politik olarak birleştirmeleri, gezegenlerini terk etmeleri ve yakınlardaki küçük dünyalara taşınmaları gerekecektir. Nihai seçimleri, bizimkiler gibi uzay uçuşu ya da soylarının tükenmesidir” diye yazıyordu.

Uzay uçuşu ya da yok oluş. Uzun vadede hayatta kalabilmek için komşu dünyaları kolonileştirmek üzere dışarıya yolculuk etmemiz gerek. Işıltılı uydumuz uzun süre yaşamak ve çalışmak için düşmanca bir yer olarak kalacak olsa da öncelikli olan Ay'daki üsler olacaktır. Bunu daha fazla verimli kaynağın -özellikle çokça donmuş yüzey altı suyunun fakat aynı zamanda Güneş ışığı, mineraller ve hafif bir atmosferin- bulunduğu Mars izleyecektir. Bu kolay ya da ucuz olmayacaktır; Mars da bugün yarın gelişen bir koloniye dönüşmeye yazgılı değildir. Fakat gelecek vadeden komşumuzun bir düzen kurmasını sağlamak, belki de onu yaşanabilir kılmak türümüzün evriminde bir sonraki önemli adım olabilir.

İki gözle görülür engel, Mars üssü inşasını engellemese de muhtemelen erteleyecektir. Bunlardan ilki paradır. Bir Mars sahanlığını tasarlamak ve hayata geçirmek için gerekli olacak onlarca milyar dolar, en iyi finansal dönemlerde dahi en iyimser NASA bütçesinin dışındadır. Ortak küresel bir çaba tek seçenek olabilir fakat bu türden büyük bir uluslararası program girişimi hiçbir zaman söz konusu olmamıştır.

Astronotların hayatta kalması aynı ölçüde ürkütücü bir güçlüktür. Çünkü Mars'a güvenli bir gidiş dönüşü garantilemek neredeyse imkânsızdır. Uzay, en zırhlı kapsülün ince kabuğunu dahi delebilecek kum boyutunda sayısız gök taşı çekirdeği ve nüfuz eden ölümcül radyasyonun öngörülemeyen solar patlamalarıyla zorlu bir yerdir. Apollo astronotları, Ay'a yaptıkları haftalık yolculuklarda, kötü hiçbir şeyin olmamasından ötürü son derece şanslıydı. Fakat Mars'a yapılan bir yolculuk aylar sürer; herhangi bir

uzay görevine oynanacak kumarda, daha fazla zaman daha fazla risk anlamına gelir.

Dahası, kitaplardaki hiçbir roket teknolojisi, bir uzay gemisinin Mars'a gitmeye ve oradan dönmeye yetecek kadar yakıt taşımasına izin vermiyordu. Bazı mucitler, tankları yeniden doldurmaya yetecek kadar yakıtı sentezleyebilmek için Mars suyunu işlemekten geçirmekten söz eder fakat bu teknoloji sadece bir rüyadır ve muhtemelen oldukça uzaktadır. Belki daha mantıklı olan -NASA yardımlarına şiddetle karşı çıkan fakat tutkulu başmakalelerde gittikçe daha fazla savunulan- seçenek, tek yönlü bir yolculuktur. Bir yolculuğa yakıt yerine senelerce tükenmeyecek erzak, yanı sıra güçlü bir sığınak ve bir sera, tohumlar, çokça oksijen ve su, kırmızı gezegenden daha fazla yaşam sunan kaynağın çıkarılmasına yardımcı olacak araçlar gönderecek olsaydık o keşif gezisi başarılı olabilirdi. Son derece tehlikeli olurdu fakat insanların yaptığı pek çok öncü keşif yolculuğu için de aynı şey geçerliydi; Macellan'ın 1519-1521 yılları arasında yaptığı keşif yolculuğu, Lewis ve Clark'ın 1804-1806 yılları arasında Doğu'ya yaptıkları keşifler ve Peary ve Amundsen'in yirminci yüzyılın başlarında yaptıkları kutup yolculukları. İnsanlar bu türden riskli maceralara girişme heveslerini yitirmemiştir. NASA Mars'a tek yönlü bir yolculuk şansı için bir kayıt formu yayınlamış olsaydı binlerce bilim insanı hiç düşünmeden gönüllü olurdu.

Bundan elli milyon yıl sonra, Dünya hâlâ canlı, mavi okyanusları ve yeşil kıtaları yer değiştirmiş fakat fark edilir olacak. İnsan türünün kaderi çok daha az kesindir. Belki de yok olmuş olacağız. Şayet durum buysa, elli milyon yıl kısa süreli egemenliğimizin neredeyse tüm izlerini ortadan kaldırmak için fazlasıyla yeterlidir; her şehir, her kara yolu, her anıt bundan milyonlarca yıl önce yok olmuş olacaktır. Uzaylı paleontologların yok olan türümüzün yüzeye yakın en küçük izini bulabilmek için uzun süreli ve zorlu bir arayışa girişmesi gerekecektir.

Fakat insanların hayatta kalması ve gelişmesi, önce yakınımızdaki gezegenlerde, sonra yakınımızdaki yıldızlarda koloni kurmak üzere dışa açılmaları da mümkündür. Şayet durum bu olursa ve

torunlarımız uzaya gidebilirse kuşkusuz Dünya daha önce hiç olmadığı kadar değerli hâle gelecektir; bir özel alan, bir müze, bir mabet ve kutsal yolculuk yapılan bir yer olarak. Belki de insanlar ancak Dünya'mızdan ayrılarak türümüzün doğduğu yerin değerini bütünüyle anlayabilecektir.

Dünya'nın Değişen Haritası: Gelecekteki Bir Milyon Yıl

Dünya pek çok açıdan bir milyon yıl içinde pek fazla değişmiş olmayacaktır. Elbette kıtalar yer değiştirmiş olacaktır fakat muhtemelen mevcut göreceli yerlerinin elli ya da altmış beş kilometre uzağından fazla değil. Güneş yine yirmi dört saatte bir yükselecek parıldayacak ve Ay hâlâ yaklaşık olarak ayda bir kez yörüngeye oturacaktır.

Fakat bazı şeyler oldukça fazla değişmiş olacaktır. Yerküre çevresindeki pek çok yerde, zorlu jeolojik süreçler bölgeyi dönüştürmüş olacaktır. En bariz değişiklikler hassas kıyı şeritlerini etkileyecektir. En sevdiğim yerlerden biri olan Calvert County, Maryland, hızla aşınan kilometrelerce Miyosen tepe ve bunların görünürde sınırsız fosil hazinesiyle bütünüyle ortadan kalkmış olacaktır. Ne de olsa ülke yalnızca sekiz kilometre genişliğindedir ve yılda yaklaşık otuz santimetre küçülmektedir. Bu oranla, Calvert bölgesi, bir milyon yıl şöyle dursun, elli bin yıl kadar bile varlığını sürdüremeyecektir.

Diğer eyaletlerde, jeolojik süreçler değerli bir yeni gayrimenkul ekleyecektir. Hawaii'nin büyük adasının güney kıyısından uzaktaki yeni okyanus zemini volkanı (hâlâ batık durumda olsa da) hâlihazırda 3,2 kilometre yüksekliğindedir ve her sene daha da fazla büyümektedir. Bir milyon yıl içinde, şimdiden Loihi adı verilmiş olan yeni bir ada dalgaların arasından yükselmiş olacaktır. Elbette, Maui, Oahu ve Kauai'nin de aralarında bulunduğu daha eski soyu tükenmiş volkanik adalar, rüzgâr ve dalgalar onları aşındırdıkça görece daha küçük hâle gelecektir.

Dalgalardan söz etmişken, gelecekte olacakların ipuçlarını elde edebilmek için kaya kalıntılarını inceleyen bilim insanları, Dünya

coğrafyasının ilerleyen ve geri çekilen okyanuslarla oldukça dramatik biçimde değişeceği sonucuna varır. Okyanus zemininde daha fazla ya da daha az yoğunlukta lav katılaştığından, uçurum volkanizmasının uzun vadeli bir etkisi vardır. Pek çok bilim insanının son Mezozoik yok oluştan hemen önce, deniz seviyesindeki dramatik düşüş sırasında gerçekleştiğinden kuşkulandığı gibi okyanus volkanizmalarındaki durgunluk dönemlerinde, deniz zeminini kayaları soğuyup çökeldiğinde, deniz seviyesi gözle görülür biçimde düşebilir. Akdeniz gibi büyük iç denizlerin varlığı ya da yokluğu ve kıtaların bir araya gelişi ve ayrılışı, gelecekteki yarım milyon yıl içinde jeosfer ve biyosferin alacağı biçimde bir başka önemli rol oynayacak olan sığ kıyı sularının boyutunda büyük değişikliklere neden olur.

Bir milyon yıl on binlerce insan nesline -tüm kayıtlı insanlık tarihinin yüzlerce katına- karşılık gelir. Varlığımızı sürdürürsek Dünya gelişen teknolojik becerilerimizle kolaylıkla hayal edemeyeceğimiz biçimlerde dönüşüm geçirebilir. Fakat soyumuz tükenerek olursa Dünya muhtemelen bugünküne oldukça benzer biçimde kalacaktır. Kara ve denizdeki yaşam gelişecek, jeosfer ve biyosferin birlikte geçirdiği evrim hızla sanayileşme öncesi dengesine dönecektir.

Mega Volkan: Gelecek Yüz Bin Yıl

Bir asteroid çarpmasının ani yıkımı, bir mega volkanın ya da sel bazaltının zaman salınımlı ölümü yanında sönük kalabilir. Dünya'nın (gökyüzünden düşen büyük bir kayayla eş zamanlı olanın da dâhil olduğu) beş büyük kitlesel yok oluş ara dönemine yerküreyi değiştiren volkanizma eşlik ediyordu.

Bu sıradan volkanik ölümle ya da yıkımın farklı biçimleriyle karıştırılmamalıdır. Bunlar Kilauea'nın yamaçlarında yaşayan Hawaii'liler için oldukça bilindik olan lav akışlarını içerir; rotalarındaki her mesken için oldukça yıkıcı fakat aynı zamanda yerleşmiş, öngörülebilir ve kolaylıkla kaçınılabilirdirler. Bir dağ yamacından saatte yüz altmış kilometreden fazla bir hızla yoğun

miktarda akkor hâlinde buhar güdümlü kül püskürtebilen ve yolları üzerindeki her şeyi yakıp kül eden piroklastik volkan patlamaları ve kül yağışları, bu sıradan volkanizma kümesinde bir şekilde daha ölümcüldür. Geçmişteki uyarılar kitlesel tahliyeleri tetiklememiş olsaydı binlerce insanı öldürecek olan Washington, St. Helens Dağı'ndaki 1980 patlamasını ve Filipinler'de 1991 Haziran'ında Pinatubo Dağı patlamasını hatırlayın. Her zamanki gibi daha da kaygı verici olan üçüncü bir volkanizma türü vardır: Bol miktarlardaki ince taneli külün ve zehirli gazların atmosferin yüksek katmanlarına püskürmesi.

Eyjaflallajökull'un 2010 Nisan ayında ve Grímsvötn'ün 2011 Mayıs ayındaki İzlanda'ya özgü kül püskürmeleri görece zayıftı ve bir kilometreküpten çok daha az kalıntı bıraktılar. Bununla beraber Avrupa'da hava seyahatini günlerce aksattılar ve yakınlarındaki bölgelerde yaşayan pek çok kişide sağlık kaygılarına yol açtılar. Laki'nin 1783 yılı Haziran ayındaki patlaması -tarihteki en büyük patlamalardan biri- Avrupa üzerinde kalıcı zehirli bir pus tabakasının oluşumuna yetecek ölçüde, tahminen sekiz kilometreküp bazalt ve bununla ilişkili olarak kül ve gaz salınımına yol açtı. İzlanda nüfusunun dörtte biri, bazıları asitli volkanik gazlara maruz kalmanın sonucunda hızla, diğerleri ise bunu izleyen kış mevsiminde açlıktan öldü. Felaket aynı zamanda güneydoğu yönünde bin altı yüz kilometreden geniş bir alanı da etkiledi ve büyük bölümü Britanya Adaları'ndan gelen on binlerce Avrupalı da Laki'nin uzun vadeli etkilerinden ötürü öldü. Krakatoa'nın 1883 yılı Ağustos ayı patlamasından ve bunun sonucunda ortaya çıkan Cava ve Sumatra'nın yakınlarındaki kıyı şeritlerini yok eden tsunamiden ötürü daha da fazla sayıda insan öldü. Tambora'nın on iki kilometreküplük hayret verici bir lav kütlesi ortaya çıkaran büyük 1815 Nisan ayı patlaması ise içlerinden en ölümcülüydü. Büyük bir bölümü tarımsal başarısızlık ve bunun sonucunda ortaya çıkan kitlesel açlıktan ötürü, yetmiş binden fazla insan hayatını kaybetti. Tambora'nın atmosferin üst katmanlarına büyük miktarlarda Güneş'i engelleyen sülfür bileşenleri püskürtmesi, 1816 yılını Kuzey Yarımküre'nin "yazsız yıl"ına dönüştürdü.

Bu tür tarihi patlamalar modern hayal gücünü haklı gerekçelerle sıkıntıya sokar. Elbette ölü sayıları, Hint Okyanusu'nda ve Haiti'de yakın zamanda gerçekleşen depremlerde ölen yüz binlerce bireyle kıyaslandığında sönük kalır. Fakat depremlerle volkanlar arasında önemli, dehşet verici bir fark vardır. Olası en büyük depremin boyutu kayanın gücüyle sınırlıdır. Sert kaya patlama noktasına erişmeden önce baskıya bir yere kadar katlanabilir; bu uç sınır oldukça yıkıcı fakat bölgesel bir deprem oluşturabilir; bu depremin şiddeti Richter ölçeğiyle dokuzdur.

Öte yandan volkanların boyutlarının hiçbir gözle görülür üst sınırı yoktur. Aslında, jeolojik kalıntılar, kayıtlı insanlık tarihindeki en büyük volkanik olaylardan yüz kat daha şiddetli patlamaların açık bir kanıtını sunar. Bu türden mega volkanlar dünyanın göklerini yıllar boyunca karartacak ve binlerce değil *milyonlarca* kilometrekarelik alanı değiştirecektir. En yakın zamanlı mega volkan patlaması olan ve 26.500 yıl kadar önce, Yeni Zelanda'nın Kuzey Adası Taupo'da gerçekleşen patlama, 320 kilometreküp lav ve külden fazlasını üretmiş olabilir. Sumatra'da bulunan ve 74.000 yıl kadar önce patlayan Toba, tahminen 1080 kilometreküp volkan külü salmıştır. Bu türden bir başka felaketin modern toplum üzerindeki sonuçlarını kavramak güçtür.

Bununla beraber, kayıtlı tarihteki tüm felaketlerden çok daha büyük olsalar dahi, bu mega volkanlar bile kitlesel yok oluşlara katkı sağlayan büyük sel bazaltlarının gölgesinde kalıyordu. Mega volkanların bir sefere mahsus patlamalarından farklı olarak, sel bazaltları binlerce yıllık yoğun bir volkanik aktivite sürecinin yaşadığı aralıksız bir süreyi temsil eder. Tümü küresel kitle yok oluşlarıyla örtüşen bu dönemlerin en uzununda, sayıları yüzbinler ile milyonlarca kilometreküp arasında değişen lav üretilmiştir. Bugün, yarım milyon kilometrekareden fazla bazalt akışıyla açığa çıkarılan bilinen en büyük olay, Sibirya'da, Dünya'nın en büyük kitlesel yok oluşu, 251 milyon yıl önceki büyük ölüş sırasında gerçekleşmiştir. Dinozorların 65 milyon yıl kadar önce, sıklıkla bir asteroid darbesine bağlanan yok oluşu da Hindistan'daki büyük sel bazaltlarıyla (yaklaşık 320.000 kilometrekare boyutundaki,

190.000 kilometreküp yeni kayayı temsil eden Deccan Tuzakları'yla) tutarlıdır.

Bu geniş yüzey özellikleri kabuğun ve üst mantonun basit biçimde yeniden işlemiden geçirilmesi sonucunda ortaya çıkmış olamazdı. Mevcut sel bazalt oluşumu modelleri, dev magma kabarcıklarının yavaş yavaş aşırı ısınmış çekirdek-manto sınırından yükseldiği, kabuğu çatlattığı ve soğuk yüzey üzerine fışkırdığı Dünya'nın ilk dikey tektonik çağına bir dönüşü öngörür. Bugün bu olaylar nadir olarak görülmektedir. Senaryolardan birinde, sel bazaltları arasında kabaca otuz milyon yıllık bir ara dönem vardır, bu durumda bir sonraki büyük olay için bir şekilde geç kalmışız demektir.

Elbette teknolojik toplumumuza bu türden bir olayın uyarısı dürüstçe yapılacaktır. Sismologlar yükselen sıcak, erimiş gayzerin izini yükselirken sürebilecektir. Önümüzde felakete hazırlanmak için yüzlerce yıl olabilir. Fakat insanlık bir başka mega volkanizma çağına girecek olursa Dünya'nın en şiddetli nöbetlerini durdurmak için yapabileceğimiz hiçbir şey olmaz.

Buz Faktörü: Gelecek Elli Bin Yıl

Öngörülebilir gelecekte, Dünya'nın kıtasal hatlarının en büyük belirleyici unsuru buz olacaktır. Birkaç yüz ya da bin yıllık kısa zaman dilimlerinde, okyanusların derinliği en çok Dünya'nın buzul başlıklarının, dağ buzullarının ve kıtasal buz tabakalarının da dâhil olduğu donmuş suyunun toplamdaki hacmine bağlıdır. Bu basit bir denklemdir: Toprak üzerinde buz içinde tutulan suyun hacmi ne kadar yüksek olursa denizin seviyesi de o kadar düşük olur.

Geçmiş geleceği öngörmenin anahtarıdır fakat tarihsel okyanusların derinliğini bilmemiz nasıl mümkün olabilir? Okyanus seviyelerinin uydu gözlemleri, inanılmaz biçimde doğru olsa da yaklaşık olarak son yirmi yılla sınırlıdır. Gelgit ölçümleri, daha az doğru ve yerel özelliklere bağlı olmakla birlikte, muhtemelen yüz elli yıl geriye uzanır. Kıyı jeologları antik kıyı şeridi göstergelerinin (örneğin bu türden yüceltilmiş özellikler inandırıcı biçimde

yalnızca daha yüksek su düzeyleri dönemlerini açığa çıkarabilse de on binlerce yıl öncesine dayanan kıyıya yakın tortu birikintilerinde bulunabilecek yüksek sahil taraçaları) haritalandırılmasına başvurulabilir. Muhtemelen okyanusun sığ Güneş ışığı bölgesinde yetişmiş olan fosil mercanların konumları, kalıntıları daha da uzak bir geçmişe itebilir fakat bu türden kaya oluşumları ortak biçimde, kalıntıları karıştıran yükselme, alçalma ya da yan yatma evrelerini deneyimler.

Bugün pek çok bilim insanı deniz seviyesinin daha az bariz göstergesine -küçük deniz kabuklarındaki oksijen izotoplarının değişken oranına- odaklanmaktadır. İkinci bölümde tartışıldığı gibi bu türden oranlar bize kozmik bir bedenin Güneş'ten uzaklığından çok daha fazlasını söyler. Oksijen izotopları, ısıya duyarlı doğalarından ötürü aynı zamanda Dünya buzulunun tarihsel hacminin, dolayısıyla antik deniz seviyesi değişikliklerinin çözülmesinin anahtarıdır.

Böyleyken dahi buz hacmi ve oksijen izotopları arasındaki bağlantı aldatıcıdır. Bugüne dek, soluduğumuz havanın yaklaşık yüzde 99,8'ine karşılık gelen en yoğun oksijen izotopu (sekiz protonu ve sekiz nötronu olan) daha hafif oksijen-16'dır. Yaklaşık beş yüz oksijen atomundan biri (sekiz protonu ve on nötronu olan) daha ağır oksijen-18'dir. Bu yaklaşık olarak okyanustaki beş yüz su molekülünden birinin ortalamadan daha ağır olduğu anlamına gelir. Güneş ekvatorial okyanus suyunu ısıttıkça, daha hafif oksijen-16 izotopu içeren su, oksijen-18'den biraz daha hızlı buharlaşır ve alçak enlemlerdeki bulutların geldikleri okyanuslara göre ortalama olarak biraz daha hafif olmasını garantiler. Bulutlar daha soğuk bölgelere doğru yükseldikçe daha yoğun oksijen-18 izotopunun bulunduğu su, oksijen-16'nın bulunduğu suya göre biraz daha hızlı biçimde yağmur damlalarında yoğunlaşır ve buluttaki oksijenin geçmişte olduğundan daha da hafif hâle gelmesini garantiler. Bulutlar, kaçınılmaz biçimde olduğu gibi kutuplara doğru ilerlediğinde, su moleküllerindeki oksijen okyanus suyuna göre çok daha hafif hâle gelmiştir. Bu kutupsal bulutlar yağışlarını buz örtüleri ve buzulların üzerine saldıığında, daha hafif

izotopun daha büyük bir bölümü buzun içinde hapsolmuş, okyanusları daha ağır hâle getirmiştir.

Dünya'daki suyun yüzde beşinden fazlasının kaskatı donabildiği azami küresel soğuma dönemlerinde, okyanuslardaki oksijen-18 yoğunluğu gözle görülür biçimde artar. Küresel ısınma ve buzul çekilmesi dönemlerinde, okyanuslardaki oksijen-18 seviyeleri düşer. Böylelikle kıyı tortularındaki oksijen izotop oranlarının katman katman dikkatli bir incelemesi, Dünya'nın yüzeyindeki buzun (ya da bunun yokluğunun) zaman içinde nasıl çeşitlendiğini açığa çıkarabilir.

Bu türden titizlik isteyen bir çalışma jeolog Ken Miller'ın ve New Jersey kıyılarını örten kalın deniz tortusu birikimleri üzerinde onlarca yıl inceleme yapan Rutgers Üniversitesi'nde görevli meslektaşlarının alanıdır. Yüz milyon yıl öncesine uzanan kalıntıları olan bu tortular, "foraminifera" ya da kısaca "foram" denilen çok sayıda mikroskobik fosil kabuğu içerir. Her bir küçük foram, büyüdüğü dönemdeki okyanusun oksijen izotop içeriğine sahiptir. Dolayısıyla oksijen izotoplarının New Jersey tortularında katman katman ölçümü zaman içindeki buz hacminin basit ve doğru bir tahminini sunar.

Yakın jeolojik geçmişte, buz örtüsü, deniz seviyesinde binlerce yıllık bir zaman diliminde oluşan tutarlı büyük değişikliklerle, sürekli alçalıp yükselmiş görünür. Yakın zamandaki buzul çağlarının zirvesinde, Dünya'daki suyun yüzde beşten fazla bir oranı, buza hapsolmuş, deniz seviyelerini bugünkü düzeylerinin muhtemelen doksan metre altına çekmiştir. Bundan yaklaşık yirmi bin yıl önce, bu türden bir alçak okyanus seviyesi döneminin Asya ve Kuzey Amerika arasında, bugün Bering Boğazı olarak bilinen boğaz yoluyla bir kara köprüsü oluşturduğu düşünülmektedir; bu, insanların ve diğer memelilerin Yeni Dünya'ya özgün geçiş yoludur. Aynı buzul ara döneminde bir Manş Denizi yoktu, çünkü Britanya Adaları'nı Fransa'ya kuru bir vadi bağlıyordu. Buna karşılık, buzulların büyük oranda ortadan kaybolduğu ve buz örtülerinin çekildiği azami ısınma dönemlerinde, deniz seviyeleri tekrar tekrar bugünkü seviyelerinin doksan metre üzerine çıktı ve

yerküre çapında yüz binlerce kilometrekarelik kıyı bölgesini sular altında bıraktı.

Miller ve meslektaşları, geride bıraktığımız dokuz milyon yıl içinde yüzden fazla buzul ilerleme ve gerileme döngüsü tespit etti, bunlardan en az on ikisi geçmiş bir milyon yıl içinde gerçekleşmişti; bunlar okyanus seviyesinde yüz seksen metre boyutunda hoyrat dalgalanmaya işaret eden değişikliklerdi. Ayrıntılar döngüden döngüye farklılık gösterebilir ancak bu olaylar açıkça dönemseldir ve Milankovitch denilen döngüleri yaklaşık yarım yüzyıl önce keşfeden Sırp astrofizikçi Milutin Milankovitch'in adını almışlardır. Milankovitch, Dünya'nın Güneş çevresindeki yörüngesinde, gezegenimizin eğiminin, eliptik yörüngesinin de dâhil olduğu iyi bilinen farklılaşmaların ve dönme eksenindeki hafif bir yalpalamanın kabaca yirmi, kırk ve yüz bin yıllık aralarla iklim değişikliği dönemlerinin oluşumuna yol açacağını fark etmiştir. Tüm bu farklılaşmalar Dünya'ya ulaşan Güneş ışığı oranını etkiler, dolayısıyla küresel iklim üzerinde büyük bir etkiye sahiptir.

Peki ya gelecekteki elli bin yıl? Deniz seviyelerinin, pek çok yeni yükselme ve düşüşle, dramatik biçimde farklılaşmayı sürdüreceğinden emin olabiliriz. Dönem dönem, oldukça büyük ihtimalle önümüzdeki yirmi bin yıl içinde, buz tabakaları genişleyecek, buzullar ilerleyecek ve deniz seviyesinde altmış metre ya da daha fazla oranda bir düşüş olacaktır; bu, sekiz milyon yıl içinde en az sekiz kez erişilmiş olan bir seviyedir. Bu tür bir değişimin Dünya'nın kıyı şeritleri üzerinde güçlü etkileri olacaktır. Amerika Birleşik Devletleri'nin doğu yakası kilometrelerce doğuya kayacak, sığ kıtasal eğim açığa çıkacaktır. Boston'dan Miami'ye bütün büyük Doğu Yakası limanları yüksek ve kuru iç şehirlere dönüşecektir. Yeni bir buz ve kara köprüsü Alaska'yı Rusya'ya bağlayacak ve Britanya Adaları bir kez daha Avrupa ana karasının bir parçası olabilecektir. Bu arada Dünya'nın kıta sahanlıkları boyunca en verimli balıkçılık alanları kurak bölgelere dönüşecektir.

Deniz seviyesi söz konusu olduğunda, alçalan aynı zamanda yükselmelidir. Gelecekteki bin yıl içinde, deniz seviyesinde otuz metre ya da daha fazla oranda bir yükseliş olması oldukça mümkündür.

Okyanuslarda jeolojik standartlara göre oldukça ılımlı olan bu türden bir yükseliş, ABD haritasını neredeyse tanınmaz hâle getirecektir. Deniz seviyesinde otuz metrelik bir yükseliş, Doğu Yakası'nın büyük bölümünü sular altında bırakacak, kıyı çizgilerini yüz altmış kilometreye kadar batıya kaydıracaktır. Bütün büyük sahil kentleri -Boston, New York, Philadelphia, Wilmington, Baltimore, Charleston, Savannah, Jacksonvill, Miami ve daha fazlası- sular altında kalacaktır. Los Angeles, San Francisco, San Diego ve Seattle da dalgaların arasında kaybolacaktır. Florida'nın neredeyse tamamı yok olacak, farklı yarımadası sığ denize batacaktır. Delaware ve Lousiana'nın büyük bölümü de sular altında kalacaktır. Dünya'nın diğer bölgelerinde deniz seviyesinde otuz metrelik bir artışın sonuçları daha da yıkıcı olacaktır. Hollanda, Bangladeş, Maldivler gibi bazı ülkeler bütünüyle yok olmuş olacaktır.

Jeolojik kalıntılar karmaşık değildir: Bu değişiklikler yeniden gerçekleşecektir. Şayet Dünya pek çok uzmanın şüphelendiği gibi hızla ısınıyorsa sular yakın zamanda, belki de on yılda otuz santimetre kadar büyük bir hızla yükselecektir. Uzayan küresel ısınma dönemlerinde, yalnızca okyanus suyunun ısıl genişmesi bile ortalama deniz seviyelerini üç metreye kadar yükseltebilir. Elbette bu türden değişiklikler toplumu zorlayacak fakat Dünya üzerinde çok az etkiye sahip olacaktır.

Ne de olsa bu, Dünya'nın sonu değildir. Yalnızca bizim Dünya'mızın sonudur.

Isınma: Gelecek Yüz Yıl

Çoğumuz gelecekteki birkaç milyar yılla, birkaç milyon yılla, hatta bin yılla pek ilgilenmeyiz. Çoğumuzun kısa vadeli kaygıları vardır: On yıl içinde çocuğumun kolej masraflarını nasıl ödeyeceğim? Gelecek yıl o terfiyi alacak mıyım? Borsa gelecek hafta yükselecek mi? Akşam yemeğinde ne var?

Bu bağlamda, endişelenmemiz gereken çok az şey vardır. Öngörülemeyen bir felaket haricinde, Dünya önümüzdeki yıl ve önümüzdeki on yıl içinde bugünkü hâline oldukça benzer görünecektir.

Sıra dışı ölçüde sıcak bir yaz geçirsek, mahsulleri kurutan bir kuraklık döneminden geçsek ya da benzersiz şiddette bir fırtınadan mustarip olsak da bir yıldan diğerine gerçekleşen herhangi bir değişiklik muhtemelen fark edilemeyecek kadar küçük olacaktır.

Mutlak biçimde kesin olan Dünya'nın değişmeye devam edeceğidir. Mevcut göstergeler, muhtemelen insan eylemlerinden etkilenen ve insan eylemleriyle hız kazanan bir küresel ısınma ve eriyen buzullar dönemine işaret etmektedir. Gelecekteki yüz yıl içinde, bu ısınma pek çok kişiyi pek çok farklı biçimde etkileyecektir.

2007 yazında, Grönland'ın batı yakasında bir balıkçı kasabası olan, Kuzey Kutup Dairesi'nin biraz güneyindeki Ilulissat'ta, bir Kavli Gelecek Sempozyumu'na katıldım. Bu, geleceği tartışmak için şanslı bir seçimdi, çünkü değişiklikler konferans merkezimizin hemen dışındaki, sıcak bir ortamı olan Arctic Oteli'nde gerçekleşiyordu. Bin yıl boyunca, güçlü Ilulissat Buzulu'nun parçalanarak tarafında bulunan liman, verimli bir balıkçılık alanı oluşturmuştu. Liman her yıl kaskatı donduğundan, balıkçılar bin yıl boyunca kış mevsiminde buzda balık avlama yoluna gitmişti. Yani yeni binyıla kadar. 2000 yılında (en azından bin yıllık sözlü tarihte) ilk defa, liman açık ve donmamıştır. Bir Birleşmiş Milletler miras alanı olan güçlü buzul inanılmaz bir oranda (onlarca yıllık durgunluktan sonra neredeyse üç yılda on kilometre kadar) geri çekilmektedir. Bir diğer değişiklik de şudur: Bin yıl boyunca Ilulissat ve yakındaki yerel kasabalarda, zararlı böcekler yoktu fakat 2007 yılında ve bunu izleyen tüm yıllarda, Ağustos ayında bir sivrisinek ve karasinek istilasına yaşandı. Elbette bunlar sadece anekdotlar fakat aynı zamanda geri dönüşü olmayan gözle görülür değişimin tartışmasız alametleri.

Yerküre çapında benzer değişiklikler gerçekleşmektedir. Chesapeake Körfezi'ndeki kayıkçılar, birkaç on yıl öncesine göre tutarlı biçimde daha yüksek gelgitlerin oluştuğunu raporlamaktadır. Kuzeydeki Sahra Çölü her yıl daha da kuzeye doğru ilerlemekte, Fas'ın bir zamanlar verimli olan ekilebilir topraklarını toza dönüştürmektedir. Antarktika'daki buz sahanlıkları gittikçe artan oranlarda erimekte ve kopmaktadır. Ortalama küresel hava ve su sıcaklıkları

yükseliş hâlinindedir. Bunların tümü tutarlı bir ısınma şablonunun bir parçasıdır; bu Dünya'nın geçmişte sayısız kez deneyimlediği ve gelecekte de sayısız kez deneyimleyeceği bir şablondur.

Isınmanın bazen çelişkili olan farklı etkileri de olabilir. Gulf Stream, sıcak suyu Ekvator'dan Kuzey Atlantik'e taşıyan büyük okyanus akıntısı, Ekvator'la daha yüksek enlemler arasındaki güçlü ısı farklılıklarıyla güçlenmektedir. Şayet, bazı iklim modellerinde öne sürüldüğü gibi küresel ısınma bu ısı karşıtlığını azaltıyorsa Gulf Stream'i zayıflatabilir hatta durdurabilir. İronik biçimde, hemen ortaya çıkan sonuç, iklimi Gulf Stream'in yönlendirdiği Britanya Adaları'nı ve Avrupa'nın kuzeyini bugün olduğundan çok daha soğuk hâle getirmek olacaktır. Diğer okyanus akıntıları -örneğin Hint Okyanusu'ndan Somali Yarımadası'nı geçerek Güney Atlantik'e uzananlar- benzer şekilde etkilenecek ve ılıman Güney Afrika ikliminde benzer bir kaymaya ya da Asya'nın farklı bölgelerinin nemli ve verimli kılan muson yağmurlarında bir değişikliğe yol açabilecektir.

Buz eridikçe denizler yükselir. Yakın zamana ait kaya kalıntılarına göre, zaman zaman on yılda bir, çok daha hızlı yükselişler gerçekleşmiş olsa da bazı makul öngörüler, gelecek yüzyılda altmış ya da doksan santime kadar artışlar gerçekleşebileceğini ortaya koyar. Bu türden bir deniz değişikliği Dünya çapında kıyı bölgelerinde yaşayan pek çok kişiyi etkileyebilir ve Maine'den Florida'ya kadar inşaat mühendisleri ve denize yakın mülk sahiplerinde baş ağrılarına yol açabilir fakat birkaç metre ölçüsü muhtemelen çoğu yoğun nüfuslu kıyı bölgesi için başa çıkılabilir. Bir süreliğine, bir ya da iki nesil boyunca, çoğu yerleşimcinin deniz suyunu aşmak söz konusu olduğunda gerçekten de endişelenecek çok fazla şeyi olmayacaktır.

Bazı hayvan ve bitki türleri çok başarılı olmayabilir. Kuzey Kutbu buzulunun kaybı kutup ayılarının bilindik doğal ortamını daraltacak, küçülür görünen bir popülasyon için yeni güçlükler doğuracaktır. İklim kuşaklarının kutuplara doğru hızlı biçimde kayışı aynı zamanda tehdit altındaki pek çok türü, özellikle göçebe yuvalama ve beslenme alanlarındaki değişikliklere duyarlı olan kuşları

baskı altında bırakabilir. Yakın zamana ait bir raporda, yalnızca birkaç derecelik ortalama bir küresel ısı artışının, gelecek yüzyılın bazı iklim modellerinin öngörülerini dâhilinde, Avrupa'da yüzde kırka yaklaşan ve Avustralya'nın kuzeybatısındaki verimli yağmur ormanlarında yüzde yetmişi aşan soy tükenme oranlarını tetikleyebileceği tahmininde bulunulmuştur. Bir diğer çarpıcı uluslararası raporda, bilinen yaklaşık altı bin kurbağa, kara kurbağası ve semender türü arasından yaklaşık üçte birinin, benzer şekilde, temelde ölümcül bir amfibi mantarsı hastalığının ısıya bağlı olarak hızla genişlemesi tehlikesi altında olduğu görülmüştür. Gelecek yüz yıl içinde farklı olarak ne olursa olsun, hızlı bir yok oluş dönemine giriyor gibiyiz.

Gelecek yüz yılın (bazıları garantili, diğerleri oldukça mümkün olan) belirli dönüştürücü olayları, aniden olacaktır: Büyük bir depremin yarattığı karmaşa, bir mega volkanın patlaması ya da 1,6 kilometre genişliğinde bir asteroid. İnsan toplulukları yüz yılda bir gerçekleşen fırtına ya da depremlere hazırlıksız görünme eğilimindedir; bu, gerçek anlamda yıkıcı olan ve bin yılda bir gerçekleşen felaketler için çok daha az geçerlidir. Dünya'nın öyküsünü okurken, bu şok edici olayların norm, kaçınılmaz, Dünya tarihinin sürekliliğinin bir parçası olduğunu görürüz. Bununla beraber, yaşadığımız dönemde tektonik mermiden (kozmetik füze değilse) kaçabilmek umuduyla, şehirlerimizi aktif volkanların ve Dünya'nın en aktif fay kuşaklarının üzerine kurarız.

Oldukça yavaş ve oldukça hızlı arasında, normalde yüzlerce ya da binlerce yıl süren istikrarsız jeolojik süreçler (iklimlerde, deniz seviyesinde ve ekosistemlerde yalnızca birkaç nesillik bir aralıkta fark edilebilen kaymalar) görülür. En büyük kaygımız bu tür değişikliklerin kendisi değil, *oranları* olmalıdır. Çünkü iklim, deniz seviyesi ve ekosistemler taşma noktalarına erişebilir. Çok üzerine gidilirse, olumlu geri bildirim döngüleri etkisini gösterebilir. Normalde bin yıllık olan bir süreç on ya da yirmi yılda gerçekleşebilir.

Rehavete kapılmak, özellikle kayaların kusurlu yorumlarıyla desteklendiğinde kolaydır. Bir süre için, 2010 yılına kadar, modern zamanlara ilişkin kaygılar 56 milyon yıl öncesinin paralel bir

senaryosu (erken evrimi ve memelilerin yayılışını dramatik biçimde etkileyen kitlesel yok oluşlardan biri) üzerinde sürdürülen çalışmalarla bir şekilde dinmişti. Paleosen-Eosen Termal Maksimum, ya da kısaca PETM diye adlandırılan bu zorlu olayda, binlerce türün görece ani biçimde yok oluşuna tanıklık edilmişti. PETM yaşadığımız dönem için önemlidir, çünkü Dünya tarihinde en hızlı, iyi belgelendirilmiş ısı değişimidir. Atmosferdeki karbondioksit ve metan yoğunlaşmalarında, görece hızlı bir volkan kaynaklı artış, sera etkisinin çift ısı kapanı gazları, bin yıldan uzun süreli olumlu geri bildirimlere ve bununla tutarlı, ılımlı bir küresel ısınma evresinin oluşumuna yol açmıştır. Elbette bazı araştırmacılar, PETM'yi, küresel sıcaklıklarda yaklaşık 10 derecelik bir artış, deniz seviyesinde hızlı bir yükselme, okyanusların asitlenmesi ve ekosistemlerde kutuplar yönündeki gözle görülür kaymalarla günümüzde yaşanan, elbette kötü, fakat çoğu hayvan ve bitkinin yaşamını tehdit edecek kadar yıkıcı olmayan olaylarla yakından ilişkili görüyordu.

Penn State jeoloğu Lee Kump ve meslektaşlarının yakın zamanda yaptığı keşifler süregelen herhangi bir iyimserlik sebebini ortadan kaldırmış olabilir. 2008 yılında Kump'un ekibine Norveç'ten, PETM'nin bütün zaman aralığını koruyan bir çekirdek numunesine (atmosferdeki karbondioksit ve iklimin değişiklik oranlarını katman katman en ince ayrıntılarıyla belgeleyen tortul kayalara) erişim hakkı verilmişti. Kötü haber, on yıldan uzun bir süre boyunca Dünya tarihindeki en hızlı iklim karmaşası olduğu düşünülen PETM'nin bugün olanların yoğunluğunun onda birinden az bir yoğunlukta atmosfer değişiklikleriyle tetiklenmiş oluşudur. Atmosfer yapısındaki ve ortalama ısıdaki, PETM imha senaryosu sırasında bin yıldan fazla süren küresel değişiklikler, yalnızca son yüz yıl içinde, insanlar büyük miktarlarda karbon-yoğun yakıtları yaktıkça aşılmıştır.

Bu türden hızlı bir değişikliğin bilinen hiçbir örneği yoktur ve hiç kimse Dünya'nın nasıl tepki vereceğini bilmemektedir. 2011 yılının Ağustos ayında, üç bin jeokimyacının Prag'daki buluşmasında, yeni PETM verilerine aşına olan iklim uzmanlarının ruh hâli dengeliydi. Bu ihtiyatlı uzmanların toplumsal öngörülleri

ölçülü kalmış olmasına karşın, bira içerken duyduğum yorumlar karamsar, ürkütücüydü. Sera gazı yoğunlaşmaları aşırı hızlı biçimde artacak olursa bilinen hiçbir mekanizma bu aşırılığı soğuramaz. Isınma, senaryonun içerebileceği tüm olumlu geri bildirimlerle birlikte büyük bir metan salınımını mı tetikleyecektir? Deniz seviyeleri geçmişte pek çok kez olduğu gibi, hızla yüzlerce metre yükselecek midir? Bilinmeyen bir bölgeye giriyoruz; Dünya üzerinde muhtemelen geçmişteki tüm benzerlerinden farklı olan ek-sik planlanmış küresel çapta bir deney yürütüyoruz.

Kayaların tanıklığının ortaya koyduğu, yaşamın kendisi her ne kadar dirençli olsa ve her zaman olacak olsa da, biyosferin, taşma noktalarında, ani iklim değişikliği dönemlerinde büyük baskı altında olduğudur. Tarımsal üretkenliğin de içinde olduğu biyolojik üretkenlik, bir süre kesinlikle hızla düşecektir. Bu türden dinamik koşullar altında, bizim gibi büyük hayvanlar en büyük bedeli ödeyecektir. Kayaların ve yaşamın bir arada geçirdiği evrim kesinlikle tüm şiddetiyle sürecektir fakat insanlığın bu milyarlarca yıllık destan içindeki rolü bilinmezliğini sürdürür.

Şimdiden bu tür bir taşma noktasına eriştik mi? Belki içinde bulunduğumuz on yıl içinde, belki yaşamlarımız boyunca erişemeyeceğiz. Fakat taşma noktalarıyla ilgili işte böyle bir durum söz konusudur; gerçekleşinceye kadar bu noktada olduğunuzdan hiçbir zaman emin olamazsınız. Konut balonu patlar. Mısır halkı isyan eder. Borsa duvara toslar. Ne olup bittiğini yalnızca geriye dönüp baktığımızda, süredurumu yeniden kurmak için çok geç kalındığında anlarız. Elbette Dünya tarihinin pek çok döneminde böyle şeyler yaşanmıştır.

Epilog

İklimler değişir, deniz seviyeleri değişir, yağmur ve rüzgârlar değişir. Yaşamın yüzey ve denizlerdeki dağılımı değişir. Kayalar ve yaşam milyarlarca yıldan bu yana olduğu gibi bir arada evrilmeyi sürdürür. Dünya'nın evrendeki yörüngesini nasıl değiştirmiyorsak küresel değişimi de durduramayız.

Ne Dünya üzerindeki yaşamı ortadan kaldıracabilir ne de amansız evrimini durdurabiliriz. Yaşam yerkürenin her hücresine nüfuz etmiştir. Kutuplardaki buzlarda, kaynayan asit havuzlarında, yerin kilometrelerce altındaki kayalarla örtölmüş gözeneklerde ve yerin kilometrelerce üstündeki rüzgârla taşınan toz zerreciklerinde yaşam yoğun biçimde varlığını sürdürür. Ne tür aptallıklar yaparsak yapalım (ister küresel sıcaklıkların on iki derece yükselmesine neden olalım, ister havamızı ve suyumuzu zehirleyelim, denizlerdeki balıkları yok edelim, hatta küresel bir soykırımda nükleer silahlarımızı topluca açığa çıkaralım) hayat devam edecektir. İnsanlar sonsuza dek yok olabilir fakat mikroskobik yaşam neredeyse hiç duraksamayacaktır. Dünya, milyarlarca yıl boyunca Güneş çevresindeki yıllık hareketi sırasında, her gün eksenini etrafında dönmeyi sürdürecektir. Gezegenimiz milyarlarca yıl boyunca, mavi okyanusların, yeşil toprakların ve fırl fırl dönen beyaz bulutların olduğu canlı bir gezegen olacaktır. İnsanlar olsun ya da olmasın, uzaydan bakıldığında, Dünya bugün olduğundan daha az güzel olmayacaktır.

Şurası kesindir, geçmiş yüzyıllardaki insan faaliyetlerinin atmosfer yapısında dramatik değişiklikler başlattığına ve iklimdeki

değişikliklerin fizik yasaları kadar kesin biçimde gerçekleşmesi gerektiğine dair en ufak bir şüphe bile yoktur. Her ikisi de etkin sera gazları olan karbondioksit ve metan yoğunlaşmaları, milyonlarca yıl boyunca benzeri olmayan oranlarda artmıştır. Bu türden değişiklikler, tropik yağmur ormanlarını hızla çoraklaştırmamızla, deniz yaşamını hızla tüketmemizle ve yerküre çapındaki yaşam alanlarını durmaksızın yıkıma uğratışımızla güçlenir. Yaptıklarımız yüzünden Dünya'daki sıcaklık artacak, buzlar eriyecek, okyanuslar yükselecektir. Fakat Dünya için bu yeni bir şey değildir. O hâlde insanların yaptıklarının değişim sürecini hızlandırıyor oluşunu neden önemseyelim?

Öncelikle, denizdeki canlıların kitlesel bir ölüm yaşadığını ya da tarımsal üretimin aniden kesildiği bir dünyada ortaya çıkacak ıstırabı hayal edin. Sular altında kalacak olan milyonlarca kilometrekarelik verimli işlenmiş toprak, sular altında kalacak liman kentleri, kaybolan yaşamlar ne olacak? Yerinden edilmiş ve evsiz kalmış bir milyar insanın çilesini gözünüzde canlandırın.

Eyleme geçecek olursak bu kesinlikle “gezegeni kurtarmak” istediğimiz için olmayacaktır. Yeryüzü, 4,5 milyar yıldan uzun süre boyunca, sürekli, ölçüsüz bir değişim sürecinden çıktıktan sonra, kurtarılmaya ihtiyaç duymaz. Belki de bazı ahlakçılar, bunun yerine balinaları ya da kutup ayılarını kurtarmaya odaklanacaktır, çünkü kayıpları kalıcı ve inkâr edilemez biçimde üzücü olacaktır. Fakat bu büyük hayvanların, fillerin, pandaların, gergedanların veya hem karizmatik hem de dünyevi bir milyon farklı türün yok oluşu, Dünya için geçici bir kayıptır. Yeni büyük ve harikulade hayvanlar jeolojik bir anda kaçınılmaz olarak, belki bir milyon yıldan fazla olmayan bir sürede o boş hücreleri dolduracak biçimde gelişecektir. Bizim gibi büyük memeliler kitlesel yok oluştan mustarip olabilir fakat diğer omurgalılar, belki kuşlar, yerimizi alacaktır. Belki de yakın zamanda oldukça hızlı biçimde geliştiği gösterilen penguenler, boşlukları dolduracak biçimde şekil değiştirecek ve ışık saçacaktır: Balinaya benzeyen penguenler, kaplana benzeyen penguenler ve ata benzeyen penguenler. Belki de penguenler

büyük beyinler ve kavrayan parmaklar geliştirecektir. Ne yaparsak yapalım, Dünya rengârenk, canlı bir Dünya olmayı sürdürecektir.

Hayır, endişelenmeyi seçecek olursak bu öncelikle insan ailemiz için olmalıdır, çünkü biz en riskli grupta yer alıyoruz. Dünya büyük bir israf ve hata ayıklayıcıdır. Yaşam tüm ihtişamıyla sürecektir fakat insan toplumu, en azından mevcut savurgan hâliyle, yeteri kadar iyi olmayabilir. Biz insanların, ya düşüncesizce eylemlerimizle ya da aynı ölçüde düşüncesizce eylemsizliğimizle, dile getirilmemiş acı ve yıkımı kendi türümüze yükleme yönünde üzücü bir potansiyelimiz var. Biz yaşadığımız Dünya'yı, Carl Sagan'dan alıntı yapacak olursak "solgun mavi noktamızı" gittikçe daha fazla değiştirmeyi sürdürürken etkili bir eyleme geçmek için kalan zaman elimizden kayıp gitmektedir.

Dünya bu noktada sessiz değildir; öyküsü, kayaların zengin kalıntılarında okunmak için oradadır. Binlerce yıl boyunca, Dünya'nın öyküsünü, evimizi tanıma çabası içinde arayacak kadar zekiydik. Ondan zamanında ders alacağımızı umalım.

Teşekkür

Düzinelerce arkadaş ve meslektaşım bu çalışmaya ilişkin fikirlerin oluşmasına ve gelişmesine katkı sağladı. Özellikle mineral evrim kavramını 2008 yılında ilk evrelerinde benimseyen dört bilim insanına müteşekkirim. Uzun süredir arkadaşım ve iş arkadaşım olan mineralog Robert Downs minerallerin doğası ve dağılımına ilişkin kayda değer uzmanlığını sundu. John Hopkins Üniversitesi'nden, lisansüstü eğitim günlerimizden beri tanıdığım kayaçbilimi uzmanı John Ferry, mineralojiye yeni yaklaşıma çok yönlü kuramsal bir katkı sağladı. Daha önce Jeofizik Laboratuvarı'nda doktora sonrası araştırmacısı olan ve şimdi de Boston Üniversitesi'nde çalışan jeobiyoloji uzmanı Dominic Papineau, diğer Carnegie danışmanlarının itirazlarına karşın, mineral evrim fikrinin en kavrayışlı ve yapıcı eleştirmenlerinden biriydi. Son birkaç yıl içindeki en yakın profesyonel meslektaşım olan John Hopkins Üniversitesi'nden coğrafya kimyacısı Dimitri Sverjensky, mineral evrimin kavramsal gelişimine pek çok yeni fikir ve iç görüş getirdi. Bu dört arkadaş mineral evrim fikrinin ilk savunucularıydı ve tümü açık ve etkili ortaklar oldular. Bu kitabın yayınlanması onların yardımı olmadan mümkün olmazdı.

Kanada Jeolojik Araştırması'ndan Prekambriyen Dönem jeoloğu Wouter Bleaker'dan, Smithsonian Enstitüsü'nde çalışan gök taşı uzmanı Timothy McCoy'dan ve Arizona Üniversitesi'nden biyomineraloji otoritesi Hexiong Yang'den paha biçilmez iç görüşler edindik. Bu fikirlerin ilk olarak yayınlanmasına katkı sağladılar. David Azzolini, Andrey Bekker, David Bish, Rodney Ewing, James

Farquhar, Joshua Golden, Andrew Knoll, Melissa McMillan, Jol-
yon Ralph ve John Valley ile yapılan sonraki iş birlikleri kavramı
detaylandırdı ve bizi heyecan verici yeni rotalara yöneltti. Özel-
likle nadir bulunan berilyum ve bor elementlerinin evrimi üze-
rinde yaptıkları çalışmalarla alanı niceliksel anlamda yeni bir dü-
zeyeye çeken Edward Grew'a müteşekkirim.

Yaşamın kökenleri alanındaki pek çok meslektaşımın katkıları
olmasaydı bu kitap yazılamazdı. Henderson James Cleaves, George
Cody, David Deamer, Charlene Estrada, Caroline Jonsson, Chris-
topher Jonsson, Namhey Lee, Kataryna Klocho, Shohei Ono ve
Adrian Villegas-Jimenez'e özel teşekkürlerimi sunuyorum. Har-
vard'lı paleontolog Andrew Knoll ve pek çok meslektaşıyla, özel-
likle Charles Kevin Boyce ve Nora Noffke, yanı sıra Neil Gupta'yla
yaptığım iş birliklerinden sonsuz fayda sağladım.

Deep Carbon Gözlemevi'ndeki meslektaşlarım Connie Bertka,
Andrea Magnum ve Lauren Cyran'dan, yanı sıra Alfred P. Sloan
Vakfı'ndan, bu küresel çabaya girişilmesi için cömertçe bir destek
sunan Jesse Ausubel'den sonsuz destek aldım. Bu kitap üzerinde
çalışırken yaşadığım dikkat dağınıklığının büyük bölümünü or-
tadan kaldırdılar. George Mason Üniversitesi'ndeki meslektaşla-
rım, özellikle Richard Diecchio, Harold Morowitz ve James Tre-
fil, mineral evrim kavramının gelişimi boyunca sayısız tartışmaya
girdiler. Yanı sıra bu proje için koşulsuz bir destek sunan ve beni
cesaretlendiren Jeofizik Laboratuvarı yöneticisi Russell Hemley'e
müteşekkirim.

Pek çok bilim insanı, bu kitabın araştırma sürecinde paha bi-
çilemez öneriler ve bilgiler sundu. Robert Blankenship, Alan Boss,
Jochen Brocks, Donald Canfield, Linda Elkins-Tanton, Erik Hauri,
Linda Kah, Lynn Margulis, Ken Miller, Larry Nittler, Peter Olson,
John Rogers, Hendrick Schatz, Scott Shepard, Steve Shirey, Roger
Summons ve Martin van Kranendonk'a teşekkürlerimi sunuyorum.

Kitapta Ariel Anbar, Chris McKay ve Bruce Sherwood'un dü-
şünceli yorumları ve düzeltmelerinden de yararlanıldı. Bu kitabın ge-
lişim sürecindeki heyecanları ve profesyonellikleri için Viking yazı

işleri ve üretim ekibine de müteşekkirim. Alessandra Lusardi kitabı ilk savunan ve gelişim aşamasında eleştirel önerilerde bulunan kişi oldu. Liz Van Hoose paha biçilemez bir editoryal rehberlik sağladı ve taslağı yaratıcılık, etkinlik ve iyi bir espri anlayışıyla son durumuna getirdi. Yanı sıra Bruce Giffords ve Janet Biehl'e de teşekkür etmek isterim.

Bu kitap için özgün fikir, bu projenin her aşamasında düşünceli bir analiz, zamanında öneri ve sürekli destek sunan William Morris Endeavor'dan Eric Lupfer'la iş birliği içinde geliştirildi. Ona çok şey borçluyum.

Margaret Hazen, 6 Aralık 2006'daki ilk dillendirilişinin çok öncesinden bu kitaptaki sunumuna kadar mineral evrim fikrinin gelişimi süresince bana destek oldu. Alandaki keskin görüşü ve buluşçu heyecanı, tüm yazılarıma ilişkin bilinçli önerileri ve isabetli eleştirileri ve yoğun bir araştırma kariyerinin başarı ve başarısızlıkları karşısındaki anlık neşesi ve incelikli sempatisi bu çabanın sürdürülmesini sağladı.

Dizin

A

ABD Jeolojik Araştırması 125
abiyojenik petrole karşı biyolojik petrol
226, 227
açısal momentum 44, 49, 51, 54-5
Âdem (İncil) 31
Afrika 30, 113-6, 123, 126, 175, 178,
180, 181, 183, 192-4, 197, 199, 201,
203, 232, 235, 243-4, 264, 270-2,
288
Afrika Levhası 126
akondritler 18, 22, 26
alanin 149
albedo 220
Aldrin, Buzz 38
Alpler 119, 271
alt manto 72
altın 13, 23, 60, 82, 85, 96, 115
alüminyum 13, 14, 59, 61-5, 70, 73, 75,
76, 83, 108, 133
plajiyoklaz feldispattaki 75
Amasia, bkz. Novopangaea
Amazon 218
amber 258
American Mineralogist (dergi) 5, 209
Amerika-Rusya rekabeti 227
amfibiler 256-9, 261, 289
amfibol 63, 108
amino asitler 138, 140-6, 149, 158
sol elli 145-6
amonyak 14, 88, 149, 207
ammonitler 262-3
fosilleşmiş 261-3
ana kaya 221
Anbar, Ariel 185, 207, 298
And Dağları 119
anortit 70-1, 76

Antarktika 2, 17, 18, 21-2, 95, 114, 126,
140, 192-4, 199, 203, 244, 261,
270-2, 287
buzul katmanlar 2, 30-1
buz içinde 18, 95, 287
göktaşları içinde 20, 21, 22
Antarktika Levhası 126
Anti-Atlas Dağları 247
Apex çörtü, Avustralya 172-5, 179
Apollo görevleri 37-8, 42, 44
Apollo 12 Ay Örneği Birincil Araştırma
Takımı 39
Apophis 273
Apalaş Dağları 2, 30, 243
ara okyanus 206, 207, 212, 220
Arkeyan Devir:
biyosfer içinde 154, 157
fosiller 171
buzul çağı içinde 233
Arctic Otel 287
argon 32
Armstrong, Neil 38
arsenik 13
asbest 61, 216
asetik asit 149
asit yağmuru 260
asitler 87
Asteroit Kuşağı 22, 25
asteroitler 11, 25, 26, 36, 39, 56, 58, 65,
75, 88, 111, 112, 142, 155, 257, 260,
262-4, 267, 273-6, 279, 281, 289
Dünya'yla çarpışma sırasında 270,
275
kita oluşum kuramı 111-2
ve uydular 36-7
ayrıca bkz. dinazorlar
astronotlar 38, 50, 276
Asya 116, 126, 192, 203, 243-4, 271-2,
284, 288

“ateş çemberi” 126

Atlantik Okyanusu 113-23

ilişkili kıyı şeritleri 119

rift vadisi 119-24, 127

atmosfer 1, 5, 6, 11, 16, 26, 27, 60, 65, 68, 69, 74, 78, 79, 82, 83-6, 88, 93, 96, 97-9, 103, 105, 108, 131, 136, 138, 142, 145, 157-9, 161-6, 170, 186, 187, 198, 200-1, 205, 207, 215-25, 228, 230, 233, 242

ilk 98, 105, 138, 157

gelecek 270

Mars'ta 26

Titan'da 26

Triton'da 26

Venüs'te 26

ayrıca bkz. küresel ısınma; Büyük Oksitlenme Olayı; sera etkisi

atom numarası 42

atomlar 3, 5, 6, 10-4, 31-2, 42, 60-6, 72, 82, 84, 85, 92, 96, 100, 136, 146, 156, 156, 163, 167, 169, 170, 175-7, 187, 207, 229, 268

ısı üretiminde 68

Avrasya Levhası 126

Avrupa 25

su ve buz üzerinde 88, 133

Avrupa Uzay Ajansı 26, 90

Avustralya 3, 19, 50, 99, 101, 109, 114, 157, 172, 174-85, 189, 190, 192-4, 197, 203-4, 239, 244, 252, 270-2, 289

kratonlar içinde 194-6

fosil araştırmaları içinde 174, 175, 176, 177, 178

Avustralya Ulusal Üniversitesi 176

Avzyan oluşumu 206

Ay:

yaşı 49

anomalileri 46

bazalt üzerinde 75

eş zamanlı Dünya bilgisi 42-3, 101

çekirdeği 41

döngüleri 53

Dünya'dan uzaklık 50, 52

kadar kuru 41, 91

elementleri 60

patlaması 275

Dünya'daki su için uygun biçimde 91-3

üzerine inişler 1, 36, 37-44, 59

Ay'ın karanlık bölgeleri 75

mineral kompozisyonu 42, 109

yörüngesi 45, 51, 53, 54, 277

tuhaflikları 36-7

primordiyale karşı mevcut olan 50-2

Dünya'dan çekilmek 54-5, 79, 82 dönüşü 49

boyutu 36, 47

yüzeyi 1, 70, 91

hakkındaki teoriler 36-7, 42-4

gelgitler ve 50-4

üzerindeki su 91-3

Ay Karşılama Laboratuvarı, Houston 38

Ay kayaları 36, 37-44, 92

yazarın iletişimi 38-40, 43, 92

Ay'ın kökeninin belgesi olarak 40-6, 70

karşı Dünya mineralleri 44

Ay Maden Arayıcısı 92

Ay modülleri 38

Ay tozu 40-2

yazarın denetimi 43-4

Ay tutulmaları 53

azurit 184

B

bakır 13, 156, 184, 186

balık 248

balinalar 29, 263, 267, 294

Baltık 198-9, 203, 218

Barghoorn, Elso 179

basınç:

manto içinde 96-7

nükleer füzyon içinde 11

bataklıklar 193, 245, 250, 257

Batı Afrika kratonu 218

- bazalt 69, 75-8, 80, 99, 103, 107-12,
 120-4, 126, 128-31, 133, 144, 186,
 191, 194, 218, 255, 270, 279-82
 Dünya kabuğunda 1-3, 75-8, 186
 manyetik sinyali 121
 erimesi 108
 okyanus zemininde 22, 120-4, 270
 kıtaların temeli 194
 kayalık gezegenlerde 16, 21, 26,
 27, 133
 batması 129
 volkanik patlamalar 76
 aşınması 10
 Bean, Alan 38
 Belt-Purcell süper grubu 202-3
 beril 210
 berilyum 82, 108, 191, 210, 211, 298
 Bering Boğazı 284
 beyaz Dünya 215-40
 bilim kurgu 89
 Birinci Dünya Savaşı 114
 Birleşik Amerika Levhaları 198
 birleşik kratonlar 195
 birleşme çizgileri 127
 bitkiler:
 yenilebilir 256
 tehlike altında 289
 çiçeklenen 262
 yapraksız 253
 yapraklı 254-7
 bitki fosilleri 252-5
 yazarın araştırması üzerinde 253-5
 biyogenez 137, 138, 142, 148
 biyokütle, gömülmesi 219-20, 236
 biyolojik petrole karşı abiyojenik 226
 biyomineralleştirme 246-7
 biyomoleküller 138, 140, 142, 146, 158,
 167, 175, 176, 182, 183, 236
 biyosfer, *bkz.*, jeosferin ve biyosferin
 birlikte evrimi
 Blankenship, Robert 168-9
 “bomba” (deneysel petroloji aygıtı) 69
 “bombalar,” volkanik 77
 bor 191, 210-1
 Boyce, Kevin 252, 253, 254
 böcekler 85, 248, 256, 258, 287
 Brasier, Martin, Schopf’a karşı 174
 Brezilya 115, 194, 199, 203
 Brocks, Jochen 176-8, 298
 buharlaşma 94
 Buick, Roger 189, 207
 bulutlar 94, 99, 102, 1043 131, 186, 216,
 246, 262, 269, 274, 283, 293
 Burgess kil taşı 249
 buz 2, 5, 15, 76, 85
 Antarktik 16
 Arktik 4
 Dünya’nın geleceğinde 282
 Jüpiter’in uyduları üzerinde 25
 Ekvator yakınlarında 221
 kutuplarda 222
 özellikleri 85-6
 ayrıca bkz. buzullaşma; buzullar
 buz dağı tespiti 117
 buz dağları, granit analogisinde 110
 buz köprüleri 264
 buz örtüleri 89, 283, 284
 buz pateni yapmak 85
 buzul çağları arası dönemler 264
 buzul çağları 221-3, 260, 262, 264
 gelecek 267, 284-5
 buzullar 93, 189, 222, 223, 231, 233,
 240, 250, 282, 283, 284, 285, 287
 ayrıca bkz. buzul çağları; kartopu
 Dünya; *belirli buzullaşmalar*
 Dünya tarihi kayıtlı 231
 tortular içinde 221
 buzullaşma 28, 231, 232, 237, 239, 245,
 262, 263, 264, 265
 “büyük altı” element 60, 62, 64, 70, 75,
 83, 107
 bütan 156
 Büyük Buhran 117
 Büyük Cottonwood Kanyonu, Utah 52
 Büyük Darbe 35-49
 büyük insansı maymunlar 264

Büyük Oksitlenme Olayı 161, 162, 163,
165, 170, 181, 184, 186, 189, 192,
205, 206, 211, 269
kanıtı olarak kayalar 162-5
ikinci 234-6
hakkında kuşkuculuk 163
üçüncü 257-8
zamanı 165, 189
Büyük Ölüm 258, 260, 261
nedeni 259-60
Büyük Patlama 5, 7, 9-15, 31, 82
Zamanlaması 31
Büyük Set Resifi, Avustralya 3

C

Cabeus krateri 92
California Akıntısı 94
California, Üniversitesi
Berkeley'de 167
Los Angeles'ta 171, 229
Riverside'da 235
Callisto 88, 133
Cameron, Alastair 47
canali 89
Canfield Okyanusu 206
Canfield, Donald 206, 208, 298
Canterbury Katedrali 275
Carnegie Enstitüsü 41, 69, 92, 115, 141,
144, 182, 230
cevher 61, 82, 109, 187, 205
yıldız 10
Challenger, HMS 117
Chamberlin, Rollin, 116
Charon, buz üzerinde 88
Chesapeake Körfezi 29, 287
Fosilleri 29
Choubertella 248
civa 13, 68, 186, 211, 212
Clementine görevi 92
Clinton, Bill 172
Cody, George 254, 298
Collins, Mike 38
Columbia (Nena; Nuna; Hudsonland)
199

Conrad, Charles, Jr. 38
Cosmos 275

Ç

çöller 3
göktaşları içinde 17-8
çekirdek numunesi 290
çekirdek:
Dünya'nın 72, 73, 74, 107, 122,
123, 127, 130
Ay'a karşı Dünya'nın 42, 45
gezegenimsilerin 21, 22
gezegenlerin 64
çekirdek-manto sınırı 73, 74, 282
çekirdek (atom) 10, 11, 12, 13, 60
çift değerlikli demir 62, 63
çift sistemler (yıldız) 24
Çin 192, 194, 199, 203, 206, 239, 246,
252, 256
çinko 13
çocuğun hayatta kalması, soğuk hava
kuramı 264
"çoklu geçici varsayım" 36

D

"derin sıcak biyosfer" 227-8
D" (D iki üssü) katman 73, 74
Daguinaspis 248
dağ formlarında 3, 30, 243
dağlar 3, 70, 73, 74, 75, 77, 117, 175,
222, 243, 272
dalım 193
dallı ayaklılar 247, 250, 258
dalma 127
damarlı bitkiler 86, 251, 252
damarlı demir oluşumları 163, 205,
207, 215, 232, 234
Darwin, Charles 28, 139
Darwin, George Howard 36, 43, 113
Deamer, David 143, 148, 298
demir 11, 12, 13, 15, 16, 17, 19, 22, 42,
43, 44, 49, 59, 62, 63, 64, 73, 74, 76,
83, 91, 98, 103, 104

- çift değerlikli ve üç değerlikli 62, 63
 Dünya'nın çekirdeğinde 40, 43, 47, 62, 74
 Dünya üzerinde 60, 62-4
 elektron donörü olarak 62-3, 156
 yeşil ya da mavi rengi 62-3
 Aya karşı Dünya'yla ilgili 43, 44, 45, 49
 okyanusların içinde 205
 kırmızı rengi 63
 üç kimyasal rolü 62-3
ayrıca bkz. aralıklı demir oluşumları; oksit
 deneysel taşbilim 68-9
 deniz laleleri 250, 258
 deniz radarı 117
 deniz tabanı düzlükleri 118
 deniz yıldızı 250
 denizaltı teknolojisi 117, 121
 denizanası 236, 239, 245
 deprem tespiti 126-7
 depremler 72, 120, 125, 126, 127, 130, 265, 281, 289
 derin Dünya deneyleri 225
 derin su döngüsü 95-8
 derin zaman 28-33
 Devoniyen Dönem 52
 dikey tektonik 111, 131, 282
 dinozorlar 28, 29, 56, 58, 252, 261, 263, 264, 281
 disk, Güneş Sistemi oluşumunda 16, 17, 25
 dişler 242, 246
 diyabaz 77
 diyatome 168
 DNA 134, 135, 137, 144, 150, 151, 158, 177, 215, 234, 237
 Doğu Afrika 114
 Doğu Pasifik, altında sırtlar 120
 doğum kusurları 146
 Doppler kayması (kızıla kayma) 31
 Doushantuo oluşumu 239, 246
 dönmenin ortaklığı 16
 döteryum 229
 Du Toit, James 115
 durağanlık 6, 200
 hayvan evriminde 245
 "sıkıcı" milyar döneminde 201, 212, 215, 232, 233
 duyarga sistemleri 168
 dünit 70, 71
 Dünya Çapında Standartlaştırılmış Sismografik Ağ (WWSSN) 125
 Dünya dışı yaşam, arayış 25-6, 27, 88, 89, 135, 141-2, 168, 227
 Dünya Mirası Sit Alanı, Köpekbalığı Koyu, Avustralya 180
 Dünya sistemleri fotoğrafı 1, 6
 Dünya sistemleri, bağlantılı olarak 6
 Dünya tarihi:
 kara evresi 57-80
 mavi evresi 81-105
 "sıkıcı" milyar evresi 189-213
 gri evresi 107-31
 yeşil evresi 241-66
 geleceğin temelinde öngörülmesi 3, 267-91
 kırmızı evresi 161-87
 kratonlarda ortaya konulduğu gibi 194-5
 gök taşlarında ortaya konulduğu gibi 16-9
 kayalarda ortaya konulduğu gibi 2-3, 4, 6, 81, 295
 daha kısa günler içinde 51-2, 79
 durağanlık içinde 6, 200, 201, 212, 213, 219, 221, 234
 dönüşümsel olaylar içinde 6
 ayrıca bkz. belirli olaylar
 beyaz aşaması 215-40
 ayrıca bkz. jeosfer ve biyosferin birlikte evrimi
 Dünya:
 yaşı 6, 28-32, 33, 58, 81, 107, 133, 161, 189, 215, 241, 267
 yaşamın değiştirdiği biçimiyle 157, 161, 287-91, 293-5

çarpışmaları 47, 48, 49, 57, 58, 65, 191
 ayrıca bkz. Theia-Dünya çarpışması
 soğuması, bkz. küresel soğuma çekirdeği 39, 48, 73, 107
 kabuğu, ayrıca bkz. bazalt; granit belirleyici zaman ölçeği 30-1
 çeşitlenmesi 79, 82-3, 108
 baskın elementleri 60-4
 dinamik yapısı 2-6, 134, 189-90, 213, 215, 242, 267-91
 oluşumu 7-33, 35-6, 59
 geleceği 267-91, 293-5
 "Goldilocks" bölgesinde 27
 yaşanılabilirliği 84, 148, 155, 166, 217
 ev mecazı 216-7
 insan yaşamına kayıtsız olarak 266, 278-9, 286, 291
 bileşik sistemleri 216
 içi 66-7, 68, 71-5, 130
 iç basıncı 73, 74
 iç ısıları 74, 79
 katmanlı tabakası 62, 72
 canlı 156-8
 manyetik alanı, bkz. manyetik alan mantosu 70-1, 72, 76, 107
 Ay'ın uzaklığı 50, 52
 Ay'a karşı 42, 45
 yörüngesi 51-2, 285
 öngörülen yaşam sonu 24, 270
 döngüsü 52-3, 54, 79
 yedi temel gerçeği 6
 boyutu 46
 katılaşması; ayrıca bkz. kristalleşme
 yüzeyi 50, 54, 58, 59, 65, 69, 71, 83, 101, 102, 112, 119, 120, 128, 129, 131, 140, 143, 152, 157, 162, 165, 169, 193, 194, 197, 202, 216, 245, 257, 269, 284
 Theia'nın çarpışması, bkz. Theia-Dünya çarpışması

üç boyutlu olarak 6
 eğimi 44
 dönüştürücü güçleri 137, 265
 özgünlüğü 133-4
 geçmişteki evren 9-15
 ısınması, bkz. küresel ısınma üzerindeki su 27, 42, 90-1, 93-5
 ayrıca bkz. Dünya tarihi
 Dünya'yla kesişen asteroidler 273-4
 Dünya-Ay sistemi 44, 45, 47, 51, 54, 55
 Kaliforniya 127
 derinliği 126, 127
 gelecek 280-289
 sualtı 120, 125-6
 Dünyalar Savaşı (Wells) 89

E

Edikara Dönemi 238, 239, 247
 hayvanların hakim olduğu bir yer olarak 238-9
 eğreltiotları, fosilleşmiş 250
 Eksobiyoloji Programı 141
 eksobiyoloji 141
 elektrik, iletkenleri 64
 elektron mikroprobu 254
 elektronlar 10, 13, 60, 63, 64, 156, 157, 167, 168
 elementler
 "büyük altı" 60, 62, 63, 64, 70, 75, 83, 107
 hakim Dünya 60-4
 yaşam 12-3, 136
 periyodik tablosu 11, 13, 59, 226
 yıldızlarda üretildiği şekilde 11-3
 nadir 41, 82, 108, 186
 kayalar 13
 tohumlanmış olarak uzay 12-4
 ayrıca bkz. kozmokimya
 elmaslar 5, 14
 endosimbiyoz yaşam 237, 238
 -e karşı Darwinci evrim 237
 enerji 9, 134

yaşam için 136, 157, 158, 168, 170, 207
Eofallotaspis 247
 Eratosthenes 1, 3, 6
 erozyon 70, 19
 etanol 68
 evaporit mineraller 91
 Everest, Dağ 113, 246
 evren 8-14
 yaşı 30
 genişlemesi 8
 kökeni 6, 7-8
 üst manto 72
 evrim 148
 artışı 242
 Darwinci 135, 136, 138, 151, 237
 insan 265
 canlılar 130, 157, 242, 256-7
 mineral 183-4
 Ewing, Maurice 120
 Eyjafjallajökull 280

F

Fanerozoik Devir 241, 242
 Farquhar, James 164, 165, 298
 Fas 19, 20, 21, 247, 248, 287
 Fasiyes 250
 feldspat 60, 61, 70
 granit içinde 108
 filler 140, 263, 294
 Flagstaff, Ariz., gözlem içinde 89
 Fogel, Marilyn 182, 254
 foraminiferidler (foramlar) 284
 fosfat 157, 159, 219, 235, 256
 fosfor 12, 136, 148, 157, 234
 fosiller:
 hayvanların 239
 karbonat tepelerindeki 247
 kimyasal 175
 kıtasal ilişkilerdeki 115, 120
 en eskiye ilişkin anlaşmazlık 172-3
 Dünya'nın yaşının belirlenmesinde 28-9

fotosentezin bir kanıtı olarak 171-4
 balık 256
 kurbağa 249
 katı kabuklu hayvanlarla ilgili 245-8
 manyetizmi 193
 Marslı 172
 mikrobik 155, 173-6
 çok hücreli 237
 Müslüman mabedinde 248
 Miyosen 278
 en eski 171, 172, 174, 176, 178, 179, 180
 bitki 251-5
 Dünya tarihinin kaydı olarak 250, 258
 en küçük 174-8
 yumuşak bedenli hayvanlara ait 239, 245, 249
 kaybının aralıklı kanıtı 259, 263
 spor 251
 trilobitler 247, 248, 250, 252, 258, 262
 yaşam için gerekli olarak 234-5
 fotosentez 95, 158, 159, 161, 165, 166, 171, 178, 219, 223
 karbon içinde 219-20
 fosil kanıtı 171-3
 buzul çağında 223
 mikrobik matlar 179
 kökenleri 168-9, 171
 füzyon teorisi 36-7, 113

G

“Goldilocks” bölgesi, Dünya içinde 27
 “güç kristalleri” 61
 gabro 77
 galaksiler:
 oluşumu 15
 Dünya'dan çekilmek 31-2
 Ganymede 25
 Gaoyuzhuang oluşumu 206
 Gaskiers buzullaşması 231, 245

gayzerler 25, 67, 79, 99, 111, 112, 128, 131, 139, 282
 gaz devi gezegenler 24-6, 107
 yapısı 16
 -e karşı kayalık gezegenler 16-7
 gaz devleri 51, 88
 geçiş bölgesi 72, 98
 gelecekteki Dünya 267-91
 çöl dünya olarak 269-70
 oyun sonu 267-9
 gelgitler 25, 53, 55, 251, 263, 287
 gelgitsel çıkıntı 54
 genetik, yaşamın temeli olarak 134-7, 150
 genişleme:
 granit adaları 129, 130
 gezegenimsiler 21, 129
 gezegenler 55
 genişleyen Dünya modeli 116, 125
Geological Society of America Bulletin 123
 geri bildirim döngüsü 216-20
 hızlanan değişim olarak 290
 iklim yumuşamasında 217-21
 küresel ısınmada 216, 224-6, 286
 metan içinde 226
 mikroplar ve kil içinde 236
 kartopu Dünya içinde 222-3
 geri dönüşüm:
 atomların 8
 yıldız maddesinin 15
 gezegen oluşumu 18, 21, 108
 gezegenimsiler 32, 35, 37, 43, 46, 58, 130, 191
 çarpışması 22-3, 28
 oluşumu 22-4, 191
 gezegenler:
 Güneş Sistemi'ndeki dağılımı 16-7
 oluşumu 14
 yörüngeleri 16
 dönüşü 16
 -e karşı yıldızlar 25
 glikoz 167
 Gold, Thomas (Tommy) 227, 228

Gosse, Philip 31
 Gould, Stephen Jay 249
 gök taşları 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 26, 59, 83, 84
 ticari değeri ve ilişkisi 19-20
 demir 17, 19, 22
 Marslı 20, 172-3
 içinde keşfedilen mikroplar 172-3
 mineral oluşumu içinde 21, 23
 Ay bombardımanı içinde 41
 Dünya tarihinin kaydı içinde 17-20
 türleri 22
 ayrıca bkz. akondritler; kondritler
 gözler 246,7, 250
 grafit, ilk mineral olarak 14, 183
 granat 95
 granit 131
 canlı olarak 109-11
 kompozisyonu 108-9
 Dünya kabuğunda 107-31
 oluşumu 108-30
 buz dağı analojisi 110
 Green River Şeyl alanı 2
 Wyo. 2, 30
 Grew, Ed. 210, 211, 298
 gri Dünya 107, 131
 Grönland 199
 fosil araştırmaları içinde 176, 207
 buzulları 2, 3, 31, 104
 Grotzinger, John 200
 Gulf Stream 45, 288
 Gunflint çörtü 179, 206
 gümüş 13, 191
 Güneş emilimi 104-5
 Güneş ışığı 51, 53, 102, 104, 158, 165, 167, 183, 220, 224, 244, 265, 269
 bitkilerde 255
 fotosentezde 167
 güneş rüzgarı 16, 27, 38, 74, 92
 Güneş Sistemi:
 yaşı 9, 27, 30
 anomaliler içinde 45, 48-9
 birleştirilmesi 23-6

şans 58
 kolonileştirmesi 277
 ortak kökeni 16, 44
 kökenin kozmik ipuçları 15-23
 gezegenlerin içindeki dağılımı 16-7
 Dünya'nın öngörülen kolonileştirilmesi 277
 oluşumu 15-16, 17, 24, 30, 32
 tek-yıldız sistemi olarak 24
 önceki zaman 30-1
 Güneş tutulmaları 53
 Güneş:
 doğuşu 15-6
 parlaklığı 103-5
 Güneş Sistemi'nin hakimiyet altına alınması 23, 32, 49
 Dünya'nın son oyununda 268-9
 ateşlenmesi 15, 16-7, 25
 öngörülen yaşam süresi 23-5, 268
 dönüşü 15
 Güney Afrika 115, 157, 175, 178, 180, 181, 183, 197, 232, 288
 Güney Amerika 19, 113, 115, 123, 126, 192, 203, 244, 270, 271, 272

H

Hadean Devir 58, 81, 102
 Dünya'nın yüzeyinde 78-80
 yaşamın başlangıçları içinde 102-3
 hafif karbon 219, 220, 222, 229, 254
 hafniyum 21
 Hales, Stephen 166
 halkalar:
 Satürn'ün 25
 Uranüs ve Neptün'ün 25
 haritalar:
 renk topoğrafik 119
 Juan de Fuca Tepesi'nin 123
 Yeni Dünya'nın 113
 geçmişteki ve gelecekteki Dünya'nın 192-4, 197
 Hauri, Erik 92, 93, 97, 298
 Hawaii Adaları 2, 30

oluşumu 2
 volkanik aktivite üzerinde 30, 74, 76, 278
 hayvanlar 236-40
 ve yenilebilir bitkiler 256
 tehlikede 267
 ilk 239
 sert kabuklu 28-9, 246-7, 250, 262
 yumuşak bedenli 239, 245, 247, 249
 Hazen, Margee 249, 250
 Heezen, Bruce 119, 120, 125
 helyum çekirdeği 11
 helyum 5, 10, 11, 12, 13, 15, 16, 24, 26, 27, 58, 59, 88, 107, 268
 Dünya üzerinde 28-9
 Güneş'te 24, 268
 hematit 63, 157
 hidrojen 5, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 24, 26, 27, 42, 58, 59, 83, 84, 85, 88, 90, 91, 92, 94, 96, 97, 98, 103, 107, 136, 148, 164, 169, 185, 225, 229, 267, 268, 269, 270
 Dünya'da 26, 27
 hafife karşı ağır 229
 yıldız oluşumunda 10-2
 Güneş'te 24, 268
 suda 84-5, 87, 98
 hidrojen bombası 11, 268
 hidrojen molekülleri 13, 169
 hidrokarbonlar 26, 224, 225, 226, 227, 228, 233
 hidroksil grupları 87
 hidronlar 87, 95, 103
 hidronyum iyonları 87, 103
 Himalayalar 119, 243, 271
 Hindistan 114, 192, 194, 197, 235, 243, 244, 263, 281
 eşleşen kıyı çizgisi 114
 Hint Okyanusu, altındaki çıkıntılar 120, 124
 Hoffman, Paul 221, 222, 223, 231, 232
 Holmes, Arthur 110, 111
Homo habilis 265

Homo sapiens 264

Hood, Dağı 202

hopanoidler 158, 159, 176, 177, 178

Hudson Nehri 77, 199

Huygens uzay aracı 26

hücre tabanlı elmas 97, 208, 225

hücreler 66, 69, 97, 134, 135, 137, 140,
142, 143, 145, 150, 155, 157, 159,
161, 163, 168, 173, 176

I

"Inception of the Clay Mineral Factory,
The" (Kennedy) 235

Iapetus Okyanusu 272

Ilulissat Buzulu, Grönland 287

Index Fossils of North America (Shrock)
248

Intrepid 38

Io 25

ısı transferi 65-7

ısı yayım hücreleri 191, 271
teknolojik 266

ısı yayım 66, 67, 74, 79, 111, 127-30,
133, 191, 265, 271

ısı:

Dünya'nın iç bölgesinde 64-7, 74,
78, 80, 104, 127, 264
gök taşlarında 21

İ

içedönüklük 271

İkinci Dünya Savaşı 69, 117

iklim 217-23

mevcut değişiklikler içinde 240
gelecek 267

ılımlı dalgalanmalar 241

istikrarsız 221-4

iletim 66, 67, 127, 128

granit 111-2

yükselişi 126

ilk ışık 10-2

ilksel Dünya 35, 46, 59, 98, 170, 191,
194

ilksel kıtalar 191

İngiliz Müzesi 173

insanlar:

uyumlu ve dirençli olarak 265, 266
Kuzey Amerika'da ortaya çıkışı 28,
265, 286

ortak primat atası 162

ilk 264-6

göçebe 266

olası yok oluşu 267, 278, 286, 291

insanların kökeni 264

insansılar 264

İskandinavya, buzul çökeltileri içinde 2

İskelet Sahili, Namibya 222

İsveç 30, 227

iyon bağları 63

iyon mikroprobu 92

iyonlar 61, 63, 87

İzlanda 76, 280

izostatik yeniden düzenleme 110

izotop bölümlenmesi 163-4

izotopologlar 229, 230

J

Jack Hills, Avustralya 99, 101, 109

Japonya 94, 125, 199, 225, 271

Jefferson, Thomas 17

Jeffreys, Harold 115

Jeofizik Laboratuvarı, Carnegie

Enstitüsü 41, 69, 182, 225, 228,
234, 253, 254, 297, 298

jeokimyaya karşı organik kimya 144

jeoloji 110, 112, 113, 114, 115, 116, 121,
124, 130, 154, 155, 190, 192, 195,
198, 200, 203, 204, 208, 210, 234,
235, 245, 248, 249, 278, 281, 284,
285, 289, 294

jeolojik süreçler, kademeli 25, 278, 289

jeolojik takvimler 30

jeosfer ve biyosferin birlikte evrimi 184,
201, 234, 235, 260, 279

jeosfer, *bkz.* jeosfer ve biyosferin ortak
evrimi

Joggins, Nova Scotia 249

Joyce, Gerald 135

Juan de Fuca Tepesi, manyetik haritası
123
Jüpiter 16, 24
gaz devri olarak 14, 24-5
uyduları 25, 36, 88, 133, 141

K

Kara Delikler Neden Kara Değil?

(*Why Aren't Black Holes Black?*) (Hazen
ve Singer) 81

"kıtasal kayma" 115, 116

"Küçük Yeşil Adamlar" 227

kabuk:

Dünya'nın 48, 70, 210, 265

ayrıca bkz. bazalt; granit

okyanussal 118, 125-6, 128

kabuklar, fosil 282-3

kafadanbacaklılar, fosilleşmiş 262

Kah, Linda 200, 201, 204, 207, 298

Kalahari kratonu 218

kalsit 225

kalsiyum 13, 14, 59, 61, 62, 63, 64, 70,
73, 76, 83, 87, 103, 108, 131, 133

Kambriyen "patlama" 29, 246-8

Kambriyen Dönem 28, 243, 247, 263

Kambriyen sınır 28

kambur balinalar 267

Kamen, Martin 167

kan, demir içinde 63

Kanada Rocky Dağları 120, 246

Kanada, fosil araştırmaları 175

kaplanlar 294

kaplıcalar 66, 79

kara bitkileri 251, 255

kara delikler 261

kara toprak 57-80

karasinekler 287

karbon 12, 14, 26, 30, 42, 83, 84, 133,
136, 137, 138, 141, 142, 143, 148,
149, 155, 157, 175, 177, 183, 186,
219, 225, 229

biyokütlede 219, 236

iklim ve çevrede 228

derin 228

hafife karşı ağır 229

en önemli unsur olarak 228

organiğe karşı inorganik 183

bitki fosilleri içinde 254

geri dönüşümü 84

yıldızlarda 10, 11

yaşam için hayati önemiyle 9,
136-7

karbon monoksit 14, 216

karbon-14 167

karbonat 87, 103, 131, 157, 225, 231,
245, 246, 247

karbondioksit 14, 27, 65, 82, 86, 89, 95,
103, 104, 131, 138, 158, 165, 166,
183, 198, 216, 217, 219, 220, 222,
223, 224, 228, 230, 233, 239, 240,
241, 269, 290, 294

fotosentezde 158, 165

Karbonifer Dönem 257, 258, 260

karbonik asit 103, 198, 230

kartopu Dünya 215-40

üzerine tartışma 231-2

gizemi 232-5

kartopu-sera döngüleri 235, 239

Kauffman, Stuart 150

Kavli Gelecek Sempozyumu 287

kayalar 253

kratonlarda 195-6

Dünya'nın ortaya konulduğu

biçimde tarihi 2-3, 4, 6, 81, 241,
295

Büyük Oksitlenme Olayı'nın kanıtı
olarak 162-5

fasiyesi 250

donması ve erimesi 75-6

kaynağı olarak hayat 4, 183-4

okyanus zemininin 120-1

en eski 68-71, 171, 175

oksijen içinde 60-1

silikon-oksijen bağları içinde 61

yaşam kaynağı olarak 4, 183

ayrıca bkz. jeosfer ve biyosferin
birlikte evrimi;

mineraller; Ay kayaları;
 petrokimya
 kayaların, erimesi 76
 kayalıklı (karasal) gezegenler 17, 21, 26,
 27, 107, 133
 kompozisyonu 16, 21, 60, 133
 karşı gaz devleri 16-17
 granit içinde 133
 görece kuru olarak 88
 su üzerinde 88-9
 kelebekler 238
 kenet kuşakları 195, 197
 Kennedy, Martin 235
 Kenorland (Superia) 197, 198, 212, 233
 Kepler, Johannes 54
 kırmızı cüceler 23
 kırmızı Dünya 161-87
 kıta sahanlıkları 118, 193, 260, 285
 kıtalar 3, 8, 30, 72, 79, 102, 107, 108,
 109, 111, 112, 114, 116, 118, 120,
 124, 126, 127, 129, 130, 131, 161,
 170, 186, 191, 192, 193, 194, 195,
 200, 202, 203, 204, 211, 212, 216,
 217, 220, 221, 236, 239, 241, 242,
 243, 244, 267, 270, 272, 277, 278,
 279
 asteroid darbe kuramı 142, 260,
 263, 267, 273, 275, 281
 temelleri olarak kratonlar 194-5
 savruluşu, *bkz.* levha tektoniği
 Kıtasal uyumlar:
 sahil şeridi/kıyı çizgisi 196
 açıklanacak hipotez 210, 227, 238
 ayrıca *bkz.* levha tektoniği
 kızıl ötesi ışınımı 88, 127
 kızıl ötesi spektroskopisi 88, 97
 kızıla kayma (Doppler kayması) 31
 kiklotronlar 167
 kil 23, 29, 42, 91, 95, 97, 111, 144, 176,
 177, 179, 180, 185, 195, 210, 236,
 250, 255
 Mars'ta 91
 kimyasal bağ 60, 63, 64, 87, 149
 kimyasal reaksiyonlar, ilk 11-3

kiralite 145
 kireç taşı 4, 157, 159, 180, 195, 219, 220,
 222, 225, 246, 247, 250, 255
 fosiller içinde 250
 kitlesel yok oluşlar 242, 259, 260, 261,
 262, 263, 264, 279, 281, 290, 294
 içinde rahatlık 290
 belgelenmesi güç 259, 263
 sonrası fırsat 261
 ayrıca *bkz.* belirli olaylar
 klor 87
 klorofil 168
 kloroflorokarbonlar 165
 kloroplastlar 237
 Knoll, Andrew 298
 Kolombiya Üniversitesi 119
 kondritler 18, 21, 22, 23, 27, 31, 83, 130
 uçucu maddelerin kalıntıları
 olarak 43, 44, 49, 57, 78, 83, 84, 98,
 99, 108
 kondrüller 191
 Kongo kratonu 218
 korindon 14
 kozmik kümeleşme 10
 kozmik yenilik 12
 kozmik ışınlar 90, 142, 169
 kozmokimya 59
 kök mantar 255
 kök sistemleri 252
 kömür 137, 250, 257
 köpek balıkları 29, 256
 kratonlar 194-9, 203, 218, 232
 dünya çapında dağılımı 194-9,
 202, 219
 kristaller 61
 oluşumu 14, 73
 okyanus oluşumunun kalıntıları
 olarak 99-102
 kristalleşme 5
 Dünya kabuğunun 68-71
 krom 41, 42, 61
 kuantum mekaniği 164, 235
 kum taşı 100, 181, 195, 250
 fosiller içinde 180-1, 250

Kump, Lee 290
 kurbağalar 289
 fosilleşmiş 249
 kurşun 27, 32, 76, 100, 191
 atomik denge 31, 100
 kuşlar 58, 288
 varlığını sürdüren dinazorlar
 olarak 263
 kutup ayıları 267, 288, 294
 kutuplar, keşfi 278
 kuvars 61, 91, 108, 109, 111, 131, 144
 granit içinde 107-8
 kuyrukluyıldızlar 56, 88, 140, 155, 276
 Kuzey Afrika, çölleri 3, 19
 Kuzey Amerika Levhası 127
 Kuzey Amerika 28, 46, 94, 110, 115,
 123
 insanların gelişi 28
 kratonlar içinde 194
 Kuzey Ekvatorial Akıntısı 94
 Kuzey Pasifik Akıntısı 94
 Küba füze krizi 125
 küçülen Dünya modeli 116

kül 76-7

küresel ısınma 45, 216, 224, 225, 226,
 286, 287, 288, 290
 anomaliler içinde 44-5
 geri bildirim döngüsü içinde 216,
 224-6
 hakkında uyarılar 240, 286-91,
 293-5

küresel soğuma 220, 221, 226, 284

kütle spektrometreleri 163

kütleden bağımsız bölümlenme 164

L

“Laser-Raman Imagery of Earth’s
 Earliest Fossils” (Schopf) 174

Laki 280

Lamont Jeolojik Gözlemevi 119

Laurentia 198, 199, 202, 203, 218, 243,
 244, 272

lav 2, 58, 77, 112, 123, 218, 279, 280,
 281

lazerler 50, 225

levha tektoniği 112, 121, 126, 128, 191,
 194, 201, 202, 223, 270

“sıkıcı” milyar içinde 192-8, 199,
 202

kıtasal ilişkiler içinde 113-5

jeologların küçümsediği 115-6

ilk kanıtları 113-6

arkasındaki itici güç 120-4, 127,
 128

fosil kalıntıları 192

gelecek 267, 270-2, 277-79

buzul çağında 223-4

diğer gezegenlerde 132

içindeki levhalar 126-7

Dünya’nın korunmasında 241

üç aşaması 242-4

birleştirici prensip olarak 130

Lewis ve Clark keşif gezileri 277

limon özü 145

limon suyu 88

lipitler 138, 140, 141, 142, 143, 158,
 190, 227

lityum 5, 10, 82, 108

Loihi 278

Lowell, Percival 89

LUNA 41

M

“Mineral Evrimi” 4, 185

Macellan 277

Madagaskar 197

madencilik 115

magma 22, 35, 37, 39, 44, 48, 50, 53, 55,
 65, 68, 70, 75, 76

Ay üzerinde 52-3, 70

su içinde 95

magma hazneleri 22, 77

magma okyanusları 53, 55, 71

soğuması 71

magnezyum silikatları 21, 22, 70, 72, 76

magnezyum 11, 13, 16, 21, 22, 59, 61,
 62, 63, 64, 70, 72, 76, 83, 131, 88,
 103, 133
 malakit 184
 mamutlar 264
 manganez 156, 184, 186, 219, 234
 mantar 237, 254, 255, 256
 manto ısı yayımı 127-8
 mantolar (gezegenimsiler) 22
 manto (Dünya) 71-2, 73, 77, 95, 107
 elektronlar içinde 156
 için yinleme deneyleri 96-8
 içinde ısı ve basınç 96
 manyetik alan 74, 121, 122, 123, 124,
 193
 ve fosil manyetizması 193
 ilişkin temel bulgular 122-3
 manyetit 121
 manyetosfer 74
 Margulis, Lynn 237, 238, 298
 Mariana Adaları okyanus siperi 113
 Mariner görevleri 89-90
 Marinoan buzullaşması 231, 239
 Mars (Lowell) 89
 Mars and Its Canals (Lowell) 89
 Mars as the Abode of Life (Lowell) 89
 Mars Express uzay gemisi 90
 Mars Keşif Uydusu, NASA 90
 Mars Odyssey uzay gemisi 90
 Mars 16, 20, 22, 27, 36, 37, 47, 57, 58,
 60, 75, 89, 90, 91, 93, 107, 109, 133,
 141, 169, 170, 171, 172, 184, 185,
 186, 201, 209, 245, 269, 276, 277
 bazalt üzerinde 75
 "kanallar" üzerinde 89
 Dünya'nın öngörülen
 sömürgeleşmesi 277-8
 -tan göktaşları 20
 görevleri 89
 uyduları 36-7
 Dünya'ya en çok benzeyen gezegen
 olarak 28
 fotoğrafları 90
 kırmızı rengi 169, 185

kayalıklı gezegen olarak 16
 üzerinde yaşam arayışı 89, 140-1
 boyutu 46
 tektonik üzerinde 133
 su üzerinde 89-91, 133, 170, 184,
 269
 Mason, Ronald 123, 124, 127
 mastodonlar 264
 mavi Dünya 81-105
 maymunlar 264
 McRae Dağı, Avustralya 177
 mega tsunami 262
 mega volkanlar 267, 281
 memeliler 58, 262
 yok oluşu 262, 293
 ilk 262, 263
 Mendeleev, Dimitri 226
 Mendocino Kırılma Bölgesi 124
 mercan kayalıkları, kısa günlerin kanıtı
 olarak 3, 52, 250, 260
 mercanlar 52, 247, 250, 283
 fosilleşmiş 3, 52
 Merkür 16, 24, 25, 26, 27, 60, 75, 88,
 107, 109, 268
 bazalt üzerinde 75
 ölümü 268
 elementleri 60
 sıcak ve kuru gezegen olarak 88
 kutupsal su üzerinde 88
 yaşama elverişsiz olarak 26
 üç durumu 211
 metalik bağ 64
 metan hidrat 225, 226
 metan 14, 105, 171, 217, 224, 225, 226,
 228, 229, 230, 233, 239, 240, 290,
 291, 294
 derin-Dünya 224-5
 laboratuvar üretimi 225
 kaynakları 224-8, 229
 meteor bombardımanı 41
 metobolizma:
 kimyası 141-2
 yaşamın temeli olarak 134-7

Mezoproterozoik Dönem 189, 201, 202, 203, 204, 207, 208, 219
 Mezozoik Dönem 58, 261, 262, 263, 279
 mıkknatis ölçer 121
 MIT 75, 120
 yazarın görev süresi 110, 113
 mika 23, 42, 61, 62, 63, 97, 108
 mikroanaliz (bitki fosilleri) 254
 mikrobik matlar 178, 179, 180, 181, 183
 mikroplar:
 ve kil 236
 “derin sıcak biyosfer” 227
 buzul çağında 223
 ve metan 224
 fotosentez içinde 169, 219
 Milankovitch, Milutin 285
 Milankovitch döngüleri 285
 mileritler 139
 Miller, Ken 284, 298
 Miller, Stanley 138, 139, 140, 141, 142, 144, 148
 Miller-Urey kıvılcım senaryosu 139
 mineraller:
 yazarın kataloğu 208-9
 renkli 213
 kıtasal ilişkiler içinde 115, 130
 Dünyada en sık görülen 75
 evaporit 91
 yaşamın kanıtı olarak 208
 okyanusların kanıtı olarak 100
 ilkinin oluşumu 14
 gök taşları ve gezegenimsiler içinde oluştuğu biçimde 21, 23
 kaya-su etkileşimleriyle oluşan 90-1
 suyun ev sahipleri olarak 95, 98
 artan çeşitliliği 186-7
 ve yaşam, bkz. jeosfer ve biyosferin birlikte evrimi
 kökeni 4, 208-9
 ur-mineralleri 14, 23
 mineraloji, geleneksel 184-5
 mineraloji:

paradigma kayması içinde 4
 yazar tarafından yeniden çerçeveslendirildiği biçimiyle 185
 Mirovia 204, 218
 mitokondri 237
 Miyosen Dönem 278
 Mobil Karantina Tesisleri, NASA 38
 moissanit 14
 moleküler “mektuplar,” 145-6
 moleküller 13, 15
 hayatın kökeninde 138-55
 kendi kendini yenileyen 150, 152
 molibden 185, 186, 207, 219, 234
 Montagne Noire, Fransız Alpieri 181
 Moritanya 201
 Murchison gök taşı 143
 mutasyon 151, 152, 157, 237, 261
 N
 “New Model for Proterozoic Ocean Chemistry, A”
 (Canfield) (Proterozoik Okyanus Kimyası için Yeni bir Model) 206
 “Neoproterozoik Kartopu Dünya, A”
 (Hoffman) 222, 232
 “nominal olarak anhidrik” mineralleri 95
 Namibya 178, 181, 222
 NASA 92
 astrobiyolojide 172
 bütçesi 276
 ile tanımlanan hayat 135-6
 farklı dünyalarda yaşam arayışında 25, 136, 138-9, 172
 Nature 174, 177, 206, 209
 nebularlar 15
 oluşumu 5, 13
 Güneş Sistemi oluşumunda 13-14, 15
 nehirler 93
 neon 9
 Neoproterozoik Dönem 189
 Neptün 25, 107
 gaz devi olarak 16

uyduları 26, 36, 45
New Scientist, The 209
 Newton yasaları 164
 Newton, Isaac 115
 nikel 156, 163, 184, 186
 nitrat 157
 nitrojen 12, 26, 83, 99, 136, 157, 171, 207
 fotosentez içinde 158
 Dünya'nın değişken bir bileşeni 82, 83-4
 nitrojen oksitler 171
 nitrojenaz 207
 Nobel Ödülleri 209
 Noffke, Nora 178, 179, 180, 181, 182, 183, 298
 notilus, odacıklı 262
 Novopangaea (Amasia) 270
 nötron spektroskopisi 97
 nötron yıldızları 227
 nötronlar 10, 11, 90, 163
 nükleer füzyon tepkimeleri 11, 23, 25, 58
 nükleer silahlar 125, 293
 nükleotidler 151

O
Origins of the Continents and Oceans, The
 (Kıta ve Okyanusların Kökenleri)
 (Wegener) 115
 "oldukça düşük hız alanları" 74
 Ockham'ın usturası 46
 oksijen 1, 11, 14, 42, 60, 63, 83, 85, 100, 156, 161, 165, 169
 hayvan metabolizmasında 257-8
 atmosfere ilişkin 84, 162, 215, 219
 Dünya'da 60
 elektron alıcısı olarak 60-4, 156, 186
 ve ilk hayvanlar 231, 234
 insanlarda 186
 izotopları 42-3, 44, 283-4
 yaşamda 231, 234

okyanus derinliğinin ölçümünde 283-4
 okyanuslarda 206
 kökeni 165-9
 fotosentezde 158, 160, 186
 artışı *bkz. Büyük Oksitlenme Olayı*
 suda 84-5, 87, 97
 oksitlenme 141, 169, 170, 183, 185, 205, 211
 okyanus zemini topoğrafyası 117
 okyanuslar 70, 73, 79, 83, 87
 mavi rengi 102
 seviyesindeki değişiklikler 5, 242, 250-1
 kabuğu 118, 123, 125-6
 mevcut değişiklikler içinde 5
 ilk 87
 oluşumu 81-105
 gelecek 268, 281-7
 Jüpiter'in uyduları üzerinde 25
 derinliğini ölçmek 281-2
 içinde çözülen mineraller 131
 pH 103
 tuzluluk oranı 102-3
 tortular içinde 87-8
 Dünya'nın şekillendirilmesinde 285
 katmanlı 235
 süper okyanus 200, 204
 su depoları olarak 93
 ayrıca bkz. belirli okyanuslar
 okzaloasetik asit 149
 olivin 14, 23, 41, 61, 62, 70, 98, 100
 Olympus, Dağ 202
Omphalos (Gosse) 31
 omurgalılar 159, 246, 294
 kemirgen benzeri 263
 opal 91
 ormanlar, ortaya çıkışı 255
 Orta Atlantik Sırtı 22
 Orta Doğu, fosil araştırmaları içinde 179
 ortak katılım kuramı 37, 43
 ozon tabakası 165, 245, 261
 çöküşü 260

Ö

ökaryot 177, 215
Öklid 1, 116, 127
örümcekler 256

P

Paleontoloji 159
 moleküler 174-8
Paleoproterozoik Dönem 189
Paleosen-Eosen Termal Maksimum
 (PETM) 290
Paleozoik Çağ, kitlesel yok oluş içinde
 259, 260, 261
pandalar 267, 294
Pangaea 243, 272
 ayrılması 262
Panthalassa 244
Papineau, Dominic 235, 297
pas 63, 170, 186
 Dünya'nın yüzeyinde 185-6
Pasifik Levhası 127
Pasifik Okyanusu 37, 38, 94, 113, 122,
 125, 126, 192
 zemini 123-4
 rift vadisi 122
penguenler 294
peridotit 71, 75, 76, 77, 78, 79, 107, 109
periyodik tablo 11, 13, 59, 226
perovskit 72
pervazlar 77
petrokimya 59
petrol, kökenlerine ilişkin tartışma
 226-8, 229
petrol, yenilenebilir bir kaynak olarak
 226
Phoenix uzay aracı 90
Photosystem I ve II 169
Pickering, William Henry 113
Pilbara kratonu 176, 177, 194
Pinatubo, Dağı 280
pirit 64, 162, 205
piroksen 41, 62, 71, 75, 76, 77, 95, 96,
 98, 100, 108, 144
plajiyoklaz feldspatı 75

Plüton, buz üzerinde 88
potasyum 30, 32, 65, 108
 radyoaktif izotopu 30-1
Prag, jeokimyacılarının buluşması 290
prebiyotik karışım 149
prebiyotik kimya 138
prechronism 32
Press, Frank 249
primatlar 264
Principles of Physical Geology (Holmes)
 110
Proceedings 238
propan 156
proteinler 137, 150, 151, 167, 168, 207
Proterozoik Devir 206, 215
Prototaxites 255
pulsarlar 227

Q

“Questioning the Evidence for Earth's
 Oldest Fossils” (Brasier) 174

R

radar 90, 92, 117, 118
radyoaktif elementler 21, 120
radyoaktif izotoplar 31
radyometrik tarihlendirme 31, 122
Raff, Arthur 123, 124, 127
Rainier, Dağı 126, 202
redoks (azaltma ve oksitleme)
 reaksiyonları 141, 157, 159, 167,
 206
regolit 39
renyum 185, 186
Rhynie çörtü, Aberdeenshire, İskoçya
 253, 254
Richter ölçeği 281
Rift vadisi, Orta Atlantik 120, 121, 122
RNA 137, 150, 151, 153
RNA Dünya modeli 151
RNA dünyası 144
 karşı lipid dünyası 144
Roche sınırı 48
Rocky Dağları 94, 110, 113, 120, 246

Rodinia:

birliği 203-4, 212

kopuşu 217-21

Rogers, John 199, 298

Ruben, Samuel 167

rubidyum, radyoaktif izotopu 30

RuBisCo 167

Rumsfeld, Donald 81

Rus-Amerikan rekabeti 227

Rutgers Üniversitesi 284

S

“sıkıcı” milyar 189-213

Karanlık Çağlar analogisi 190

geri bildirim döngüleri içinde 213

mineralojisi 211-4

“sulu kartopu” Dünya 232

safir 14, 62

Sagan, Carl 275, 276, 295

sağ elli olarak 145, 146

sahil şeritleri, değişiklikler, 196

ayrıca bkz. kıtasal bağlantılar; kıta sahanlıkları

sahiller 3, 83, 102, 108, 111, 116, 131, 157, 202, 234

mikrobik matlar üzerinde 178-83

Sahra Çölü 19, 20, 21, 287

salyangozlar 250, 258

Samanyolu 15

San Andreas Fayı 127

Santa Fe Enstitüsü 150

Satürn 16, 25, 26, 36, 49, 88, 105, 107, 141

gaz devi olarak 16

buz üzerinde 88

uyduları 26, 36

halkaları 25

Schauble, Edwin 229

Schiaparelli, Giovanni 89

Schopf, J. William “Bill” 171, 172, 173, 174, 175, 178, 179

karşı Brasier 173

Science 92, 138, 173, 176, 182, 185, 207, 209, 221, 235

Scott, Henry 225, 298

Scripps Araştırma Enstitüsü 135

Scripps Okyanusbilimi Enstitüsü 123

seküler değişim 121, 122

sel bazaltları 281, 282

seleksiyon:

evrimde 138

moleküler 145, 147

selenyum 82

sentetik biyoloji 135

sera etkisi 27, 89, 104, 217, 224, 239, 290

Venüs üzerinde 88

sera gazları 105, 217, 220, 224, 225, 231, 233, 269, 294

buzul çağlarının sonu olarak 233

geri bildirim döngüleri içinde 217, 220

sert kabuklu hayvanlar 28-9

seryum 162

Shrock, Robert 248, 249

sıcak noktalar 74, 75, 111

sıcaklık:

buzul çağında 223

manto içinde 96

metan oluşumunda 228

nükleer füzyonda 10

ve PETM 290

kartopu-sera döngüler içinde 230-1, 239

Venüs'te 26

Sınırlı Test Yasağı Antlaşması 125

sismoloji ve 125

Sibirya 45, 194, 199, 203, 225, 243, 260, 261, 281

silikatlar 72, 73

silikon 11, 13, 14, 16, 59, 60, 61, 62, 72, 76, 83, 108, 133

elektron verici olarak 62-4

silikon-oksijen bağları 61, 72

Singer, Maxine 81

sismoloji 72, 73, 124, 125

sitrik asit döngüsü 149, 150, 152

sitrik asit modeli 149, 150

sivrisinekler 287
siyah çörtler 179
ayrıca bkz. Apex çörtü; Gunflint çörtü
siyah dumanlar, yaşamın kökenlerinde 139-43
siyanobakteri 158, 167, 173, 177
Slave kratonu 194
Smithsonian Enstitüsü 18, 38, 297
içinde tutulan gök taşları 18
Ay örnekleri içinde 36
trilobitler içinde 245
sodyum 87, 88, 102, 108
solgun Güneş paradoksu 233
solucanlar 236, 238, 239, 245, 246, 247, 256
Souss Nehri 247
Sovyetler Birliği 125
soyların tükenişi 258-61
Spiegel, Der 209
St. Helens, Dağı 126, 280
sterane 177
steroidler 158, 273
stratosfer 76, 233, 245
Strelley Pool, Avustralya 174
stromatolitler 155, 179, 180, 234, 245
Sturtian buzullaşması 231
su buharı 88
Dünya'nın uçucu bileşeni olarak 82, 83, 84
su yosunları:
yeşil 158, 167, 168, 178, 205, 208, 213, 215, 218-20, 223, 231, 245, 251
su:
bolluğu 88-93
kimyası 84-8
yoğunluğu 86
farklı özellikleri 85-7
Dünya'da 27, 42, 93-5
Dünya çekirdeğinde 98
yaşam için gerekli olan 85, 88, 105
Ay üzerinde bulunmayan 42, 91
saflığından yoksunluk 86-7

Mars üzerinde 27, 89-91, 93
pH 87-8
kutuplaşması 85-6
geri dönüşümü 84
yüzey altı 185
yüzey gerilimi 85-6
Venüs'ün kaybı 26-7, 50
ayrıca bkz. mikrobik matlar
Summons Laboratuvarı, MIT 176
Summons, Roger 175, 176, 177, 298
sülfat 157, 159, 162, 206, 207
sülfür 11, 12, 25, 42, 64, 82, 83, 84, 136, 148, 157, 163, 206, 207
süngerler 247
süper kıta döngüsü 212
için modeller 272
yeni mineraller ve 212
süper kratonlar 195
süpernovalar 12, 58
sürüngenler 249
ayrıca bkz. dinazorlar
Sverjensky, Dimitri 184, 186, 297
Szostak, Jack 152

Ş
şablon güdümlü sentez 143, 144, 145
şekerler 138, 142, 144, 145, 146, 149, 158, 167

T
“tek el kullanabilme” 145-7
tanecikler 10
tantal 108
tarım 94, 114, 280, 291, 294
Taupo 281
Taurus-Littrow Vadisi 40
tek kristal X-ray kırılması 41
tek yıldız sistemi 24
teleskoplar 24, 89, 91, 275
Mars'ta yaşam arayışı 85
incelenen yıldızlar 23
temeller 87-8
termodinamik, ikinci yasası 127

Tharp, Marie 119
 Theia-Dünya çarpışması 47, 48, 49
 tillitler 221, 222, 231, 232
 Tiout, Fas, fosiller 247
 Titan 26, 46, 105, 141
Titanic felaketi 117
 titanyum 41, 42, 61
 toprak kaymaları 91
 toprak 28, 38, 59, 63, 95, 102, 107, 111, 146, 154
 toryum 65
 Toutais 273
 toz, kozmik 14
 trilobitler 247, 248, 250, 252, 258, 262
 Triton 26, 45
 tsunamiler 262, 273, 280
 tundra 5, 175, 193
 tungsten 65, 96
 Tunguska Irmağı 274
 turkuaz 184
 tutulmalar 53
 tuz 87, 102, 153
 Tyler, Stanley 179

U

“uyumsuz elementler” 74
 uçucu maddeler:
 Dünya'nın bileşenleri olarak 83, 84
 Hadean Devir'de 83
 kayıp olarak 83-4, 98
 Ay'a karşı Dünya'ya ilişkin olarak 44-5
 yıldızlar tarafından üretilmiş ve yayılmış olarak 83
 volkanik aktivitede 82
 Ukrayna kratonu 198
 ultraviyole radyasyon 105, 138, 141, 164, 165
 Ulusal Bilimler Akademisi 238, 254
 Ur 197, 198, 199, 202, 203, 218
 Ural Dağları 206
 uraninit 162
 Uranüs 16, 25, 26, 36, 45, 49, 107
 aykırı rotasyonu 45, 50

 gaz devleri olarak 15
 uyduları 25
 uranyum 13, 30, 31, 65, 82, 100, 108, 162, 184, 186, 191
 Urey, Harold 138, 140
 uydular 88
 gaz devlerinin 25, 36
 yörüngeleri 16
 değişen boyutları 36
 ayrıca bkz. Ay
 uyum 256
 uzay yolculuğu, gelecek 277

Ü

üç değerlikli demir 63

V

Vaalbara 197
 Van Helmont, Jan Baptista 166
 Venüs 1-2, 55, 75
 aykırı rotasyonu 45, 50-1, 56
 atmosferi 88
 ölümü 268-9
 elementleri 60
 üzerindeki sera etkisi 217
 üzerindeki su kaybı 26-7, 48, 55, 88
 yörüngesi 26
 öngörülen ölümü 23
 kayalık gezegen 16
 tektonik hareketler 156
 Viking görevleri 90
 volkanik aktivite, volkanizma 2, 30, 50, 76, 82, 93
 bazalt içinde 75-8
 karbondioksit üretimi 220
 gelecek 277
 Hadean Devir'de 78
 Mezozoik 261
 Paleozoik 259
 uçucular içinde 82
 su içinde 95
 Yellowstone içinde 74
 volkanik kayalar 100

volkanlar 4, 78, 266
 altındaki depremler 126
 tarihsel püskürmeleri 279-80
 Io üzerinde 25
 su altında 121
 ağızları 5
ayrıca bkz. megavolkanlar; belirli volkanlar

W

“Whiff of Oxygen Before the Great Oxidation Event?, A” (Anbar) 185
 wadsleyit 72, 98
 Warriar, Santosh Madhava 199
 Wegener, Alfred 114, 115, 116, 120, 123
 Wells, H.G. 89
Wonderful Life (Gould) 249
 Wones, David 39, 40, 75

Y

yağmur 48, 65, 86, 94, 103, 166, 230, 283
 muson 288
 yakalama teorisi 37, 43
 yakut 14, 62
 yapraklar 95, 239, 251, 255
 Yaratılışçılık 32
 yarı-ömür 167
 yaşam 55, 89, 139
 anaerobik 169
 hayvan 215, 237, 245, 250, 258, 260
 yapı taşları 105, 137, 138, 141, 142, 143, 144, 158, 168
 kimyasal temeli 137
 kiralite ve 145
 tanımları 134-6
 özelliklerini ayırt etmek 134
 çeşitliliği 257-8, 264
 uygun bir çevre olarak Dünya 28
 ekstermofil (olağanüstü çevre koşullarında yaşayabilen organizma (ç.n.) 140
 insan 264-6
 içerikleri 155

varlığını sürdürmesinde manyetosfer 74
 çok hücreli 237-8
 kökenleri 14, 133-59
 ham maddeleri 134, 138, 142, 158, 167
 ayırıcı özelliği olarak yeniden üretim 96, 173
 kendini idame ettiren ve gelişen 135, 152
 su döngüsü içinde 86, 93, 95
ayrıca bkz. jeosfer ve biyosferin birlikte evrimi, Dünya dışında yaşam, arayışı
 Yellowstone 74
 yer altı suyu 90, 93-4, 176, 185, 196
 Dünya’da 93
 Mars’ta 90
 yerçekimi 25, 49
 nebula oluşumunda 5
 gezegenimsi oluşumunda 21, 25
 Güneş Sistemi oluşumunda 15, 33
 yıldız oluşumunda 10, 12
ayrıca bkz. gelgitsel çıkıntı; gelgitler
 yerçekimsel kümelenme 27, 48
 yeşil Dünya 241-66
 beş değişiklik içinde 241-2
 yıldırım:
 enerji ve 171
 yaşamın kökeninde 138-9, 143
 yıldızlar:
 içinde üretildiği şekilde elementler 9, 27, 30
 oluşumu 43, 47-8
 karşı gezegenler 23-6
 boyutu ve dayanıklılığı 58
ayrıca bkz. süpernovalar
 yıllık çökelti 30
 Yilgarn kratonu 194
 Yoder, Hatten S. “Hat,” Jr. 69, 96
 yosun hayvancıkları 258
 Young, Ed. 229
 yörüngeler:

anomalileri 45

Ay'ın 45

Güneş Sistemi'nde 14

Yucatán Yarımadası, asteroid 262

-da çarpışma 262

yumurtalar, fosilleşmiş embriyolar 239

yüksek basınçlı mineroloji 95, 96

yüzey su döngüsü 86, 93, 95

üzerindeki insan etkisi 95

Z

Zhao, Guochun 199

Zimbabve kratonu 194

zinober 212

zirkon 23, 99, 100, 101, 108, 109

granit oluşumunun kanıtı olarak

109

en eski kristaller olarak 101

zirkonyum 99, 100, 101, 109

ROBERT M. HAZEN

DÜNYA'NIN ÖYKÜSÜ

"Yıldızlardaki cevherlerin doğuşundan Dünya'mızın gelecekteki yaşanabilirliği üzerine derince düşünülmüş geniş çapta ses getiren büyük bir öykü."

-SCIENCE

Dünya evriliyor. Gezegenimiz ilk atomdan moleküle, mineralden magmaya, granit tortudan tek hücreye ve oradan da yemyeşil canlı doğaya sürekli bir değişim içindedir.

Hazen, bilimsel terminolojiyi akılları karıştırmadan kullanarak üzerinde yaşadığımız Dünya'nın milyarlarca yıl önce başlayan eşsiz öyküsünü sizlerle buluşturuyor. Uzun yıllardır ev sahipliğimizi yapan Dünya'nın bir atom molekülüyken başlayan yolculuğunun tüm ayrıntılarını büyük bir titizlikle açığa çıkarıyor.

Evrenin bir atom çekirdeğinden daha küçük bir hacme sahip olduğu zamanlardan aralarında bizim de yer aldığımız sayısız canlı türünü barındıran Dünya'nın doğuşuna kadar olan sürece şahitlik edeceğimiz bu kitapta ayrıca önümüzdeki beş milyar yılın olası senaryosu da bulunuyor.

Dünya'nın yalnızca Güneş ve kendi eksenini etrafında dönen bir kütle değil, oldukça karmaşık iç ve dış mekaniklere sahip olan hassas bir dengeler bütünü olduğunun altını çizen Dünya'nın Öyküsü, gezegenimizin oluşumu sırasında gerçekleşen olayları aşama aşama sade bir dille anlatıyor.

Bir astrobiyoloğun hayal gücü, bir tarihçinin bakış açısı ve bir doğa bilimcinin merakıyla yeryüzünü ayaklarımızın altına seren Hazen kitabın, gezegenimizin içine ve dışına yapacağımız büyük gezi için göz kamaştırıcı ve eğlenceli bir rehber olduğunu kanıtıyor.

"Hazen, konu bilim olduğunda olağanüstü bir sadelikle yazıyor, bu da hiç çaba göstermeden öğrenmemizi sağlıyor."

-THE NEW YORK TIMES

"Hazen'i okuduğunuzda Dünya'ya ve hayata karşı bir daha aynı şekilde bakmayacaksınız."

- NEIL SHUB — 27.000 Zakk'ın çoksatan yazarı



www.redingotkitap.com

/redingotkitap

0 978 605 67271 8

/redingotkitap

