

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>

36

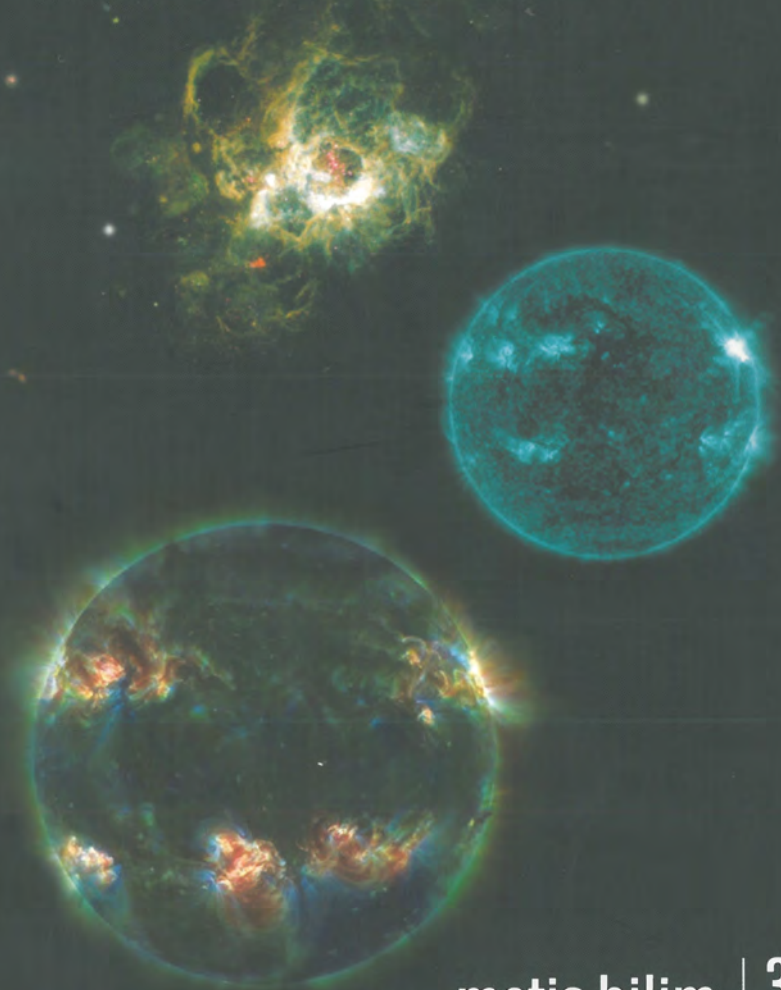
DAVID C. CATLING

Astrobiyoloji

DAVID C. CATLING

Astrobiyoloji

DÜNYADA VE EVRENDE YAŞAM



metis bilim

36

DAVID C. CATLING

Astrobiyoloji

Britanyalı gezegenbilimci ve astrobiyolog. Fizik ve astrofizik alanındaki lisans eğitimini Birmingham Üniversitesi'nde, atmosfer, okyanus ve gezegen fiziği üzerine yaptığı doktorasını ise Oxford Üniversitesi'nde tamamladı. 1995-2001 yılları arasında çalışmalarını NASA'nın California'daki Ames Araştırma Merkezi'nde yürüttü. 2001 yılında Washington Üniversitesi'nde ders vermeye başladı. Araştırmalarında gezegenlerin jeokimyasal evrimlerine odaklanan Catling, NASA'nın 2008 yılında Mars'a yönelik olarak gerçekleştirdiği başarılı *Phoenix* görevinden sorumlu biliminsanları arasındaydı. Sayısız bilimsel makalesi bulunan ve *Atmospheric Evolution on Inhabited and Lifeless Worlds* (Yaşamın Olduğu ve Olmadığı Dünyalarda Atmosfer Evrimi) adlı kitabın da eşyazarı olan Catling, halen Washington Üniversitesi'nin Yeryüzü ve Uzay Bilimleri bölümünde profesör olarak ders veriyor.



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

Astrobiyoloji
Dünyada ve Evrende Yaşam
David C. Catling

İngilizce Basımı:
Astrobiology
A Very Short Introduction
Oxford University Press, 2013

© David C. Catling, 2013
© Metis Yayınları, 2018
Çeviri Eser © Ahmet Burak Kaya, 2018

İlk Basım: Ocak 2019

Yayıma Hazırlayan: Özde Duygu Gürkan

Kapak Tasarımı: Emine Bora

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

ISBN-13: 978-605-316-149-3

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

DAVID C. CATLING

Astrobiyoloji

DÜNYADA VE EVRENDE YAŞAM

Çeviren:

Ahmet Burak Kaya



metis

İçindekiler

Teşekkür	9
1 Astrobiyoloji Nedir?	11
2 Yıldız Tozundan, Yaşama Ev Sahipliği Yapan Gezegenlere	25
3 Yaşamın ve Çevrenin Kökenleri	40
4 Çamurdan Yüceye	57
5 Yaşam: Bir Genomun Daha Fazla ve Uyum Başarısı Daha Yüksek Genomlar Oluşturmasının Yolu	77
6 Güneş Sistemi'nde Yaşam	97
7 Uzak Dünyalar, Uzak Güneşler	127
8 Tartışmalar ve Olasılıklar	144
Görseller Hakkında	151
Ek Kaynaklar	153
Dizin	155

Teşekkür

Metnin taslağının çeşitli kısımlarını okuyup birtakım düzeltmeler yapan ve önerilerde bulunan Profesör John Armstrong, Dr. Rory Barnes, Profesör John Baross, Dr. Billy Brazelton, Profesör Roger Buick, Dr. Rachel Horak, Imelda Kirby ve Profesör Woody Sullivan'a teşekkür ederim. Metnin tamamını okuyan Latha Menon ve (biliminsanı olmayan birinin perspektifini sunan) Mimi Southwood'a da teşekkür ediyorum. Yıllar boyunca Washington Üniversitesi'ndeki astrobiyoloji derslerime katılan sayısız öğrencim de beni psikolojik açıdan bu kitabı yazmaya hazırladı. Ayrıca Oxford University Press'ten Emma Ma ve Latha Menon'a teşvik ve yardımları için minnettarım.

Astrobiyoloji Nedir?

İsmin Ardındakiler

Bir Amerikan Gizli Servis ajanı, telsizine “*Astrobiyoloji* de neyin nesi?” diye seslendi. San Francisco yakınlarındaki NASA Ames Araştırma Merkezi’ni ziyaret eden bir akademisyenin kimliğini kontrol ediyordu. Ziyaretçi, NASA’nın ilk astrobiyoloji bilimi konferansına katıldığını söylemişti. Başkanlık Uçağı Air Force One’a güvenli iniş sağlayan bir pist bulunuyordu Ames’te. 2000 yılının nisan ayında Başkan Bill Clinton ve Gizli Servis maiyeti San Francisco Körfezi civarını ziyaret etmek üzere henüz iniş yapmıştı.

Ajanın sorusu yerindeydi. Astrobiyolojinin anlamı üzerinde bilimsel uzlaşmaya ancak 1990’ların sonunda ulaşılmıştı. Meslekten olmayanların veya Gizli Servis ajanlarının çok azının bu terimi duymuş olma ihtimali vardı. O zamanlar NASA, Ames’in yürüttüğü bir astrobiyoloji araştırma programını teşvik etmeye başlamıştı, ben de orada uzaybilimci olarak çalışıyordum. İlk başta, meslektaşlarım Yunanca terimin harfi karşılığı olan “yıldızların biyolojisi”nden hoşlanmamışlardı. Bir tanesi yaşamın yıldızların cehennemi içinde var olamayacağını belirtmişti alayla. Daha cömert bir yorum ise astrobiyolojideki “astro”nun, Güneş de dahil olmak üzere yıldızların çevresindeki veya basitçe uzaydaki yaşam hakkında olduğu yolundadır. Astrobiyologlar dış uzaydaki yaşam

hakkında fikir yürütebilmek için yaşamın öncelikle Dünya’da nasıl evrildiğini iyice kavramamız gerektiği konusunda hemfikirdir. Ne var ki modern bilimin en hayret verici yönlerinden biri, biyoloji hakkında bir çocuğun bile sorabileceği bazı soruları cevaplamayı şimdiye dek başaramamış olmasıdır. Yeryüzünde yaşam nasıl başladı? Bu konuda biraz fikrimiz var ama detayları bilmiyoruz. Dünya’nın ve Güneş Sistemi’nin hangi özellikleri gezegenimizi yaşanabilir kılıyor? Yine birtakım fikirlere sahibiz ama daha öğrenecek çok şey var. Peki, yaşamın basit kalmak yerine karmaşık organizmalara evrilmesine ne sebep oldu? Yine kesin bir bilgiye sahip değiliz.

İnsanlığın bilgisindeki bu boşlukları doldurmak için, *Dünya’daki yaşamın kökenini ve evrimini, ayrıca başka yerlerde mümkün olan çeşitli yaşam biçimlerini inceleyen bir bilim dalı olarak astrobiyoloji ortaya çıktı. NASA astrobiyolojiyi evrendeki yaşamın kökeninin, evriminin, dağılımının ve geleceğinin incelenmesi* olarak tanımladı. Sık kullanılan diğer tanımlar, *evrendeki yaşamın incelenmesi* veya *yaşamın kozmik bağlamda incelenmesi*’dir. Bu anlamda, astrobiyologlar hem “Yeryüzündeki yaşamın tarihi ve geleceği nedir?” hem de “Başka bir yerde yaşam var mı?” sorularının peşinden giderler.

Astrobiyolojinin 1990’ların sonunda bir disiplin olarak ortaya çıkışı dört gelişmeyle aynı anda gerçekleşti. 1996’da bir Mars meteoritinde, gezegende çok uzun zaman önce yaşam bulunduğuna dair tartışma yaratan işaretler betimlendi. Bir asteroidin çarpması sonucunda Mars yüzeyinden kopan 1,9 kg’lık bu kaya parçası nihayetinde Antarktika’ya düşmüştü. Doğru olsun veya olmasın (bkz. 6. Bölüm), fosilleşmiş mikroskobik yaşam yorumu insanları düşünmeye teşvik etti. Dahası, önceki yirmi yıl içinde biyologlar bazı mikropların yalnızca daha önce düşünülenenden çok daha geniş bir aralıktaki ortamlara dayanıklılık gösterebileceklerini ortaya koymakla kalmayıp, bu mikropların aslında sıcaklık, asit, basınç veya tuzluluk açısından aşırı koşulları *sevdiklerini* de göster-

mişlerdi. Böylece yaşam için elverişli görünmeyen yerlerde de dünyadışı mikropların var olduğunu düşünmek makul hale geldi. Üçüncü bir bulgu, 1996'da NASA'nın *Galileo* uzay aracı tarafından çekilen, Jüpiter'in uydusu Europa'nın buzlu yüzeyini gösteren fotoğraflardan geldi. Geçmişte sürüklenerek birbirinden ayrılmış buz parçalarını gösteren bu fotoğraflar buzlu kabuğun altında bir okyanusun bulunduğu işaret ediyordu. Ardından, 1990'ların ortalarından bugüne astronomlar peş peşe birçok ötegezegen –yani bizim güneşimizden başka yıldızların etrafında dönen gezegenler– buldular. Ötegezegenlerde veya Güneş Sistemimizin kozmik arka bahçesinde yaşamın bulunma olasılığı, yaşamın evrende yaygın olup olmadığı sorusunun sorulması için itici bir güç oldu.

Düşünce Tarihinde Astrobiyoloji

Her ne kadar astrobiyoloji 1990'larda ön plana çıkmış olsa da, evrende yalnız olup olmadığımız sorusu binlerce yıllık bir geçmişe sahip. Sık sık Batı felsefesinin babası olarak adlandırılan Thales (MÖ 600), yaşamın ortaya çıktığı dünyaların çoğulluğu fikrini benimsemişti. Daha sonra ise, maddenin bölünmez atomlardan oluştuğuna inanan Yunan atomcu ekolü –Leukippos'tan Demokritos ve Epikuros'a– bu “çoğulculuğu” desteklemişti. Demokritos'un takipçilerinden biri olan Metrodoros (MÖ 400) şöyle yazmıştı: “Nasıl ki koca bir tarlada yalnızca tek bir buğday başağının olması doğal değilse, sonsuz evrende de yalnızca bir canlı dünyanın bulunması doğal değildir.” Ancak, antikçağ filozoflarının çoğulculuğuyla modern Mars'ta veya ötegezegenlerde yaşam kavrayışımızı eş tutmak doğru olmaz. Metrodoros'un yıldızların çok uzaktaki Güneş benzeri nesneler olduğundan haberi yoktu; onların yeryüzü atmosferinin neminden her gün yeniden oluştuklarına inanıyordu. Atomcuların hayallerindeki meskûn dünyalar soyut bir uzaydaki cisimlerdi, günümüzde paralel evrenler için düşünüldüğü gibi. Her halükârda, Platon (MÖ 427-347) ve Aristoteles'in

(MÖ 384-322) muhalif görüşü sonunda üstün geldi. Yeryüzündeki yaşamın eşsizliği ve Dünya'nın evrenin merkezinde olduğu inancı çok uzun zaman hüküm sürdü.

Fakat eninde sonunda, Rönesans astronomları Dünya'nın Güneş etrafında döndüğünü ortaya koydular. Dünya'nın yalnızca mevcut gezegenlerden biri olduğunun farkına varılmasının hemen ardından, Güneş Sistemi'ndeki diğer gezegenlerde de hayat olabileceğine dair spekülasyonlar başladı. Gezegenlerin hareketinin üç yasasını ortaya atan astronom Johannes Kepler (1571-1630), üzerinde canlıların yaşadığı gezegenler bulunabileceği fikrine kucak açtı. On yedinci yüzyılın sonunda Felemenk astronom Christiaan Huygens (1629-95), kitabı *Cosmotheoros*'ta (1698) Güneş Sistemi'nin ötesinde yaşam hayal ediyordu: "Muazzam sayıdaki Güneşlerin etrafını saran tüm o Gezegenler. Bitkiler ve hayvanlar, hatta rasyonel yaratıklar da olmalı oralarda." Dünyadışı yaşam fikri o kadar modaydı ki, 1755'te filozof Immanuel Kant (1724-1804) Jüpiterli entelektüeller ve şehvetli Venüslüler hakkında yazıyordu.

Buna karşılık, bazı dindar âlimler Dünya'nın eşsizliği fikrine bağlı kalmaya devam ettiler. Bunun bir örneği Cambridge Üniversitesi'nden William Whewell'dir (1794-1866). *Of the Plurality of Worlds* (Dünyaların Çoğulluğu Üzerine, 1853) başlıklı kitabında Whewell başka gezegenlerde yaşam olabileceği fikrine karşı çıkmış ve 8. Bölüm'de bahsedeceğim Nadir Dünya Hipotezi etrafında dönen çağdaş tartışmanın bir ölçüde öncüsü olmuştu.

On dokuzuncu yüzyılın sonunda, başka gezegenlerdeki yaşam konusu tamamen bilimsel bir mesele olarak görülüyordu, ne var ki bilim de kısa süre sonra kendi çıkmaz sokaklarını yarattı. Giovanni Schiaparelli (1835-1910) ve Percival Lowell'ın (1855-1916) teleskop gözlemleri Mars'ta zekâ sahibi canlıların bulunma olasılığına dönük ilgide ani bir artışa neden oldu. Ne yazık ki Lowell'ın Mars'ta kanallar gördüğü yolundaki inancı, zihnin bulanık görüntülerdeki noktaları birleştirmesiyle meydana gelen bir optik il-

lüzüydü; Lowell'ın Mars uygarlığına dair fikirleri de fantaziden ibaretti. Astronomlar gezegenlerden gelen ışığın spektrumlarını incelemek gibi oldukça zahmetli yöntemler kullanmaya başladıkça, Güneş Sistemi'ndeki gezegenlerdeki fiziksel koşulların yaşam için çok da uygun olmayabileceği gittikçe belirgin hale gelmeye başladı. Neticede sarkaç diğer yöne o kadar çok savruldu ki, yirminci yüzyılın ortalarında çok az astronom gezegenlerle ilgileniyordu. Eski meraklar ancak Uzay Çağı'nda yeniden alevlendi.

Astrobiyolojinin temel soruları çok eski olsa da, “astrobiyoloji” terimi 1990'larda yaygınlaşmadan önce yalnızca birkaç kere kullanılmıştı. 1941 tarihli “Astrobiyoloji” başlıklı makalesinde Laurence Lafleur (New York'taki Brooklyn College'da felsefe dersleri veren bir öğretim üyesi) kelimeyi modern anlamından daha dar bir biçimde, gezegenimiz dışındaki hayatın ele alınması olarak tanımlamıştı. Berkeley'deki California Üniversitesi'nde astronomi dersleri veren Otto Struve da 1955'te terimi dünyadışı yaşam arayışını betimlemek için kullanmıştı. Rus astrofizikçi Gavriil Tikov (1875-1960) ve Alman astronom Joachim Herrmann sırasıyla 1953 ve 1974'te dünyadışı yaşam hakkındaki popüler fikirleri içeren *Astrobiyoloji* başlıklı birer kitap yayımlamışlardı.

“Astrobiyoloji”nin modern kullanımı 1995'te, o dönem Washington DC'deki NASA genel merkezinde görevli olan Wes Huntress tarafından ortaya atıldı. O zamanlar NASA'daki biliminsanları evrendeki yaşamı anlamak için mikrobiyal ölçekten kozmik ölçeğe kadar yaşamın araştırılması gerektiğini savunuyorlardı. Huntress bu amaç için *astrobiyoloji* sözcüğünü uygun gördü ve bu isim tuttu.

Aslına bakılırsa, astrobiyoloji onlarca yıllık geçmişe sahip olan *ekzobioloji*'nin yeniden icadı ve genişletilmesiydi. 1960'ta Joshua Lederberg (1925-2008) “gezegenimizin ötesinde yaşamın evrimi”ni belirtmek için ekzobiyoloji kelimesini icat etmişti. Bakteri genetiğindeki keşifleri için Nobel Ödülü kazanmış olan Lederberg, yaşam arayışının uzay keşiflerinin temel bir parçası

olması gerektiğini savunuyordu. NASA 1960'lardan itibaren Lederberg'in tavsiyesini dinleyerek ekzobiyoloji araştırmalarını finanse etti. Fakat çok geçmeden ekzobiyolojiyi eleştirenler de ortaya çıktı. 1964'te Harvard Üniversitesi'nden biyolog George Gaylord Simpson "bu 'bilimin' araştırma konusunun var olduğunu hâlâ gösteremediğini" öne sürdü.

Günümüz astrobiyolojisinin avantajı Simpson'ın suçlamasına maruz kalmayacak olmasıdır, çünkü merkezinde Dünya'daki yaşamın köken ve evriminin araştırılması vardır. Astrobiyoloji, yaşamın koşullarını anlamak için gezegenlerin köken ve evriminin de anlaşılması gerektiğini vurgular, bu yüzden de astronomlara ekzobiyolojiye kıyasla daha çok kucak açar.

Astrobiyolojiye benzeyen tek terim ekzobiyoloji değil. Astronomlar dünyadışı yaşamın astronomik yönüne atıfta bulunmak için 1982'den beri resmi olarak *biyoastronomi* terimini kullanıyorlar. Öncesindeyse, İrlanda doğumlu Britanyalı saygın fiziksel kimyacı J. Desmond Bernal (1901-71) *kozmobiyoloji* terimini tercih etmişti. Ancak her iki terim de yaygınlık kazanmadı.

Yaşam Nedir?

Astrobiyoloji yaşamın nasıl tanımlanması gerektiği gibi zor bir soruyu gündeme getirir. Dünya'nın ötesinde tam olarak ne arıyoruz? Yaygın yaklaşım yaşamın niteliklerini sıralamaktır: üreme, büyüme, metabolizma aracılığıyla enerji kullanma, çevreye tepki verme, evrimsel adaptasyon ve hücreler ile anatominin düzenli yapısı gibi. Ne yazık ki yaşamı bu şekilde tanımlamak birkaç nedenle tatmin edici değil. Birincisi, bu liste yaşamın ne olduğunu değil yaşamın ne yaptığını tanımlıyor. İkincisi, yaşamın bu özelliklerinin çoğu eşsiz değil. Yaşam örneğin hücrelerde olduğu gibi yapısal düzene sahiptir, ama tuz kristalleri de düzenlidir. Bazı arkadaşlarımızın çocuğu yok, bu onların canlı olmadıkları anlamına

gelmiyor bence, tıpkı üreyemeyen katırların da cansız olmamaları gibi. Büyüme ve gelişme canlı varlıklar için geçerli olsa da yanın yayılması da bu şekilde betimlenebilir. Tüm canlılar bir şeyleri metabolize eder ama bunu arabam da yapıyor. Canlılar çevreye tepki verir, ama bir cıva termometresi de çevre koşullarına yanıt verir.

Diğer yandan, bazı biliminsanları hayatı *termodinamik* –yani ısı ile enerjinin maddeyle ilişkisi– aracılığıyla tanımlamaya çalışırlar; hayatın özünün hücreler ve genetik materyal gibi istikrarlı yapıların yanı sıra metabolik atıklar ve ısıyla üretilen entropinin varlığı olduğunu öne sürerler.

Entropi teriminin ne olduğunu açıklamak gerekiyor. Hızlı ve basit bir açıklama arayan çaresiz öğretmenler sıklıkla bunu “düzensizlik” olarak adlandırır. Entropi düzensizlik değil, parçacıklar arasındaki enerji yayılımının kesin bir ölçümüdür, söz konusu parçacıklar ister atomlar ister moleküller olsun. Enerji mekânsal olarak yayılır, böylece beraber hareket eden parçacık gruplarının *uyumlu enerji* olarak adlandırılan enerjisi yayılabilir. Böylece zıplayan bir top sonunda durur çünkü hareketin uyumlu enerjisi sürtünme yoluyla molekül ve atomların tutarsız termal hareketine dönüşür. Tam tersine, durağan bir top asla (sanki canlıymışçasına) kendiliğinden zıplamaya başlamaz çünkü altındaki zeminde yeterince termal enerji bulunsa bile bu enerji erişilebilir değildir ve zemin atomlarının rasgele titreşimleriyle dağılır. Bu fenomenleri yöneten Termodinamiğin İkinci Yasası, evrendeki entropinin hiçbir zaman azalmayacağını öne sürer. Entropi artışı (veya enerji yayılımı) enerjiyi korusa da kalitesini bozar. Yüksek kaliteli enerji dağılmış değil yoğunlaşmış haldedir, tıpkı bir varil petrolde, bir atomun çekirdeğinde veya yüksek frekansa ve kısa dalga boyuna sahip fotonlarda (ışık parçacıklarında) olduğu gibi. Bu fotonlara güneş yanığına neden olan morötesi ışınlar ve bitki yaşamına enerji sağlayan görünür ışınlar da dahildir. Fizikte bu yüksek kaliteli enerji düşük entropiye sahiptir.

Entropinin yaşamla ilişkisini en çok öne çıkaran fizikçi, Nobel ödüllü Erwin Schrödinger (1887-1961) olmuştur. *Yaşam Nedir?* (1944) başlıklı kitabında Schrödinger şöyle der: “[Bir organizma] tehlikeli bir durum olan maksimum entropi durumuna yani ölüme yaklaşma eğilimindedir. Yalnızca çevresinden sürekli negatif entropi çekerek bundan kurtulabilir, yani canlı kalabilir. ... Daha gelişmiş hayvanların beslendiği düzenlilik türünü oldukça iyi biliyoruz: yiyecek olarak kullandıkları az çok karmaşık organik bileşiklerde bulunan fazlasıyla düzenli bir madde biçimi. Bundan yararlandıktan sonra, onu epey bozulmuş bir halde ortama geri bırakıyorlar.” Ne yazık ki Schrödinger besinlerin düzenli yapısını açıklamak için bilimde yeri olmayan “negatif entropi” kavramını ortaya atmıştı. Ayrıca bazı organizmaların büyümesinde entropi artışı, besine kıyasla bozulmuş biçimdeki metabolik atıklardan değil öncelikle ısı üretiminden gelir. Yirminci yüzyılın en önemli kimyacısı olarak nitelendirilen Linus Pauling’e (1901-1994) göre Schrödinger “yaşam kavrayışımıza herhangi bir katkıda bulunmadı, hatta belki yaşam ile ‘negatif entropi’ arasındaki ilişkiyi tartışarak negatif bir katkıda bulundu”.

Evrendeki entropinin daima artmasının ilginç bir yan ürünü de organizmalar gibi düşük entropili yapıların ortaya çıkmasıdır. Aslına bakılırsa, entropiyi en verimli şekilde elde etme yolu çok sayıda molekülden oluşan ve enerjiyi yayabilen düzenli yapılardır (*disipatif yapılar*). Kaynayan bir sudaki konveksiyon hücresi bunun basit bir örneğidir. Sıcak su yükselirken, çevresindeki sular aşağı doğru hareket edip onu dengeler. Dolaşım halindeki bu hücre enerjinin yayılmasına yardımcı olarak entropinin daha verimli bir şekilde artmasını sağlar. Tüm canlı organizmalar karmaşık disipatif yapılardır. Ancak, yaşamı termodinamik açıdan tanımlamaya çalışan girişimler şimdiye dek canlılarla cansızlar arasında net bir ayrım ortaya koymayı başaramadı. Örneğin yazar Eric Schneider yaşamı şöyle tanımlıyor: “çevresel entropi üreterek yerel organizasyon seviyesini koruyabilen, denge durumundan uzak

bir disipatif yapı.” Ateş de bu tanıma uyar.

Pauling’in eleştirisini bir kenara bırakırsak, Schrödinger’in organizmalarda bir çeşit bilgisayar programı bulunması gerektiği yolundaki görüşü doğrudur; bu programı günümüzde *genom* diye adlandırıyoruz. Nerede olursa olsun canlıların muhtemelen bir genoma sahip olması gerekir. Genom derken, gelecek nesillere aktarılabilen bir plandan bahsediyoruz; bu planın küçük kopyalama hatalarına maruz kalabilmesi bir organizmanın bir atadan evrimleşebilmesini sağlar ve planın içerdiği yönergeler yaşamın metabolizma gibi diğer ayırt edici özelliklerine yol gösterir. *Evrim*, bireysel özelliklerin seçilimi sayesinde popülasyonlarda nesiller boyu gerçekleşen değişimlerdir. Bu süreç önemlidir çünkü yalnızca evrim yaşamın çeşitliliğini ve daha önce sıraladığımız özelliklerinin düzenlenme şeklini açıklayabilir. Darwin’in doğal seçim mekanizmasına göre, popülasyonlardaki genetik varyasyonlar bazı bireylerin üremede daha başarılı olacak biçimde adapte oldukları anlamına gelir. Doğal seçim daha çok üreyen genleri tercih eder, böylece soylarda genetik adaptasyonlar birikir.

Evrimin merkeziliğinin farkında olan astrobiyologlar yaşamı genelde “Darwinci anlamda evrim geçirebilen ve kendini sürdürebilen kimyasal sistem” şeklinde tanımlarlar. Ne yazık ki, yaşamın oluşumunu görmek için bir deney tasarlayacak olsak bu tanım bize yardımcı olmaz. Olumlu bir saptama için evrimin gerçekleşmesini mi bekleyeceğiz? Daha iyi bir tanımda geçmiş zaman kullanılır: “Yaşam kendi kendini sürdürebilen, genom içeren bir kimyasal sistemdir ve bu karakteristikleri evrim yoluyla geliştirmiştir.” Şimdiye kadar, yaşam saptamaya yönelik uzay odaklı deneyler bir genetik yapı ölçmeyi denemedi. Örneğin 1970’lerde Mars’ta yaşam arayan NASA’nın *Viking Lander* sondaları topraktaki mikropların Dünya benzeri metabolizmalarını tanıyacak şekilde tasarlanmıştı (6. Bölüm).

Filozof Carol Cleland ve bilim insanı Christopher Chyba, yaşamı tanımlama çabalarının on yedinci yüzyıl kimyacılarının su-

yu tanımlama çabalarına benzediğini öne sürdüler. O zamanlar suyun belirli sıcaklıklarda kaynayan ve donan renksiz, kokusuz bir sıvı olduğu düşünülüyordu. Atom teorisi olmadan, hiç kimse suyun bir oksijen atomuna bağlı iki hidrojen atomundan oluşan bir molekül olduğunu bilemezdi. Benzer şekilde, belki biz de yaşamı tanımlayabilmek için gereken canlı sistemler teorisinden yoksunuzdur.

Yaşamı tanımlamaya yönelik sorunların çoğunun esas nedeni elimizde yalnızca bir örnek bulunması: Dünya'daki yaşam. Yeryüzünde yaşayan tüm organizmalar kalıtsal bilgi için nükleik asitleri, biyokimyasal tepkime hızlarını kontrol etmek için proteinleri ve enerji depolamak için fosfor içeren aynı tür molekülleri kullanıyor. Bakteride de mavi balınada da aynı temel biyokimya geçerli. Bu yüzden yeryüzündeki yaşamın hangi niteliklerinin eşsiz ve hangilerinin “yaşam” sayılmak için genel olarak gerekli olduğunu belirlemek kolay değil. Eğer Dünya dışında hayat bulursak astrobiyoloji bu muammayı çözmemize yardımcı olabilir.

Yaşamın Temel Gereksinimleri

Yaşamın kusursuz bir tanımı olmasa da, yeryüzü biyokimyasında yaygın olan bazı atomların muhtemelen dünyadışı organizmalar tarafından da kullanıldığını ve dünyadışı yaşam arayışında bize yardımcı olabileceğini düşünmek için geçerli sebeplerimiz var. Dünya'daki biyolojinin temel yapısal elementleri karbon, azot ve hidrojenidir ve kimyasal etkileşimler sıvı su içinde gerçekleşir. Astrobiyolojide dünyadışı yaşamın muhtemelen karbon temelli olacağı ve sıvı suya sahip bir gezegenin en azından “bildiğimiz şekliyle yaşama” imkân tanıyacağı yolunda yaygın bir mutabakat vardır. Bu akıl yürütmeler yaşamın sınırlı yapıtaşlarından oluştuğu olgusuna dayanır: Kimyasal elementlerin periyodik tablosu tüm evrende aynıdır.

Aslına bakılırsa, DNA (deoksiribonükleik asit) gibi milyarlarca atomdan oluşan uzun bileşikler oluşturma yetisine sahip tek element karbondur. Dolayısıyla dünyadışı yaşamın yeryüzündeki yaşamla karşılaştırılabilecek karmaşıklıkta bir genoma sahip olabilmesinin tek yolu onun da karbon temelli olmasıdır. Karbon aynı zamanda bileşiklerine eşsiz bir kimya sunan çeşitli özelliklere sahiptir, öyle ki bu özellikler organik kimyanın ortaya çıkması için yeterli olmuştur. Karbonun özel nitelikleri arasında, hem kendisiyle hem de çeşitli elementlerle tek, ikili ve üçlü bağlar oluşturabilmesi de bulunur. Karbon aynı zamanda birbirine bağlanan altıgen halkalar oluşturarak üç boyutlu karmaşıklık da geliştirebilir.

Yaşamın başlaması ve yayılması gerektiği için, yaşamın temel atomlarının yüksek miktarda bulunanlar olması muhtemeldir. Hidrojen, helyum ve oksijenin ardından evrende en çok bulunan dördüncü element karbondur. Astronomlar pek çok biyolojik olmayan organik molekülün uzayda zaten var olduğunu keşfettiler. “Havadan gelen” bu moleküller yaşamın başlaması için öncül işlevi görebilirler (bkz. 3. Bölüm). Örneğin yıldızların arasındaki tozun kütlece yüzde otuzu organik materyaldir. Güneş Sistemimizdeki karbonlu kondritler ve gezegenler arası toz partikülleri sırasıyla kütlece yüzde 2 ve yüzde 35’e varan organik karbon içerir.

Silisyumun karbon benzeri kimyasal özelliklere sahip olması, evrende karbondan on kat daha az bulunmasına rağmen dünyadışı biyokimyada karbon temelli moleküllere alternatif teşkil edebileceğinin zaman zaman öne sürülmesine neden oldu. Ama silisyum bileşikler en azından suda kararsızdır ve silisyum kolayca katı silisyum oksitlere katılır. Karbondioksit yaygın gezegen sıcaklıklarında gaz haldedir ve su içinde çözündüğünde canlıların karbondioksiti karbon kaynağı olarak kullanmasına yetecek yoğunluktadır. Buna karşılık silisyum dioksit çözünmez bir katıdır, tıpkı kuartz gibi. Silisyumun oksijen ve hidrojenle yaptığı bağlar güçlüdür, karbon-oksijen ve karbon-hidrojen bağları ise karbon-karbon bağlarına benzer sağlamlıktadır, bu da karbon temelli bileşik-

lerin alışveriş ve modifikasyon tepkimelerine girmelerini kolaylaştırır. Ayrıca silisyum-hidrojen bağları suda kolayca hedef haline gelir. Silisyum temelli moleküllerin kararlı olabilmesi için tepkimeleri yavaşlatan düşük sıcaklıklar gerekir, aksi takdirde bu tepkimeler bu molekülleri ortadan kaldırır. Bu duruma uygun soğuk çözücülerden biri, yıldızlarından uzaktaki buzlu gezegenlerde bulunan sıvı azottur. Günümüzde böyle silisyum temelli bir yaşam tamamen varsayımsaldır.

Ne var ki metabolizma ve genetik replikasyon gibi biyokimyasal süreçler için kararlı bir ortam gerekir; Dünya’da bu ortam sıvı sudur. Dünyadışı yaşam için bu ortam başka bir sıvı veya yoğun bir gaz olabilir, yeter ki o çevrede kolayca katılaşmasın. Yine de su (H_2O) bazı eşsiz özelliklere sahiptir. Ancak $-61^{\circ}C$ ’de nahoş bir sıvıya dönüşen kokulu ikizi hidrojen sülfürden (H_2S) farklı olarak, su normal basınçta $100^{\circ}C$ ’nin altında sıvılaşır. Sıvı suyun kararlılığını sağlayan şey su moleküllerindeki oksijen atomunun hafifçe negatif yüklü olması ve diğer su moleküllerinin hafifçe pozitif yüklü hidrojen atomlarıyla görece güçlü bir “hidrojen bağı” oluşturabilmesidir. Sülfür ise hidrojen sülfür molekülleri arasında daha zayıf hidrojen bağları oluşturur. Aynı zamanda, su diğer su molekülleriyle, yağlı maddelerle yaptığından daha güçlü hidrojen bağları yapar. Bunun sonucunda yağlar sudan ayrışır, bu da hücre zarlarının oluşmasını sağlayarak genlere ve metabolik süreçlere bir barınak sunar.

Suyun bir diğer sıradışı özelliğiye buzun sıvı sudan daha yoğun olmasıdır. Su donduğunda, moleküller atom düzeyinde boşluklar oluşturan halkalar şeklinde hizalanır. Eğer buz sıvıdan daha yoğun olsaydı, göllerin ve denizlerin soğuk dipleri buzlanır ve yalıtılıp donmuş halde kalırdı. Denizler aşağıdan yukarıya doğru donar ve yaşanılmaz hale gelirdi. Zira buzların yüzeye ulaştığı bölgelerden yansıyan güneş ışığı soğumaya ve daha çok buzlanmaya neden olurdu. Amonyak gibi sıvılardan oluşan denizlerin makus kaderi, kademeli olarak donmak olacaktır. Amonyak, bir

atmosfer basınçta -78°C 'den -33°C 'ye kadar sıvıdır. Ancak amonyak denizleri aşağıdan yukarıya doğru donmaya eğilimlidir; su denizleriyse, düşük sıcaklık yüzeyin buz tutmasına neden olsa da sıvı kalır.

Dünya'da nerede sıvı su varsa orada mikropları bulabiliriz (sterilize aparatlar hariç), o yüzden bildiğimiz şekliyle yaşam “karbon temelli” olduğu kadar “su temellidir” de. Dolayısıyla Güneş Sistemi keşiflerinde sıvı suyun varlığının veya geçmişte var olduğunun belirlenmesi, Mars'a gönderilenler gibi gezegen son-dalarının hedeflerinden biridir. Yine de suya alternatif organik çö-zücüler düşünmek mümkündür, bu da Satürn'ün en büyük uydusu Titan için potansiyel olarak önemlidir (6. Bölüm).

Dünya'daki yaşama dönük gözlemlerden elde edinilen bir di-ğer sonuç da sadece altı ametalin yani metal olmayan elementin –karbon, hidrojen azot, oksijen, fosfor ve sülfür– tüm canlı mater-yalin kütlece yüzde doksanını oluşturmasıdır. Bu elementler sık-lıkla “CHNOPS” olarak kısaltılır ama ben söylemesi daha kolay olan “SPONCH”u tercih ediyorum. H ve O'yu canlı dokuların ço-ğunu oluşturan suda; C, H ve O'yu da genetik materyaldeki nükleik asitlerde ve karbonhidratlarda bulabiliriz. C, H, N ve S pro-teinlerde bulunurken, P de nükleik asitler ve enerji depolama mo-lekülleri için büyük önem taşır. Bu yüzden de yaşamın ortaya çık-masını sağlayabilecek kimyasal formlarda SPONCH elementleri-nin belirlenmesi, Dünya'dakine benzer canlılar arayan uzay son-daları için bir başka pratik hedefdir.

Dünyadışı Yaşamın Önemi

Basit, mikrop benzeri dünyadışı yaşamın keşfinin gerçekten önemli olup olmadığını merak ediyor olabilirsiniz. Ama şayet Dünya dışında bir yerde ortaya çıkmış yaşamın bir örneğini bula-bilseydik, bu, yaşamın yeryüzüne bahşedilmiş bir mucize olmadı-ğını kanıtlardı. Yalnız olmazdık. Mars'ta veya Europa'nın okya-

nuslarında yaşayan en basit mikrop bile yaşamın galaksinin başka kısımlarında da var olma olasılığındaki dengeleri değiştirdi, çünkü tek bir güneş sisteminde yaşamın iki kez ortaya çıkabileceğini göstermiş olurdu. An itibariyle, Dünya'nın ötesinde yaşam olduğuna dair ikna edici bir kanıtla sahip değiliz. Ama 6. Bölüm'de, eğer açık bir zihinle yaklaşırsak Güneş Sistemimizde yaşama elverişli olabilecek en az dokuz başka gök cisminin bulunduğunu öne süreceğim. Güneş Sistemi astrobiyolojisinde son sözü söylemekten çok uzağız.

Yaşam arayışındaki ikinci önemli unsur da hayatın tanımlanmasında karşılaşılan zorluklardır. Gezegenbilimci Carl Sagan (1934-96), *Kozmik Bağlantı* (1973) adlı kitabında “gezegen keşiflerinden en çok fayda sağlayacak bilimin biyoloji olduğunu” öne sürmüştü. Dünyadışı yaşamın incelenmesi yalnızca tüm canlıların sahip olduğu, tanımlanması zor niteliklerin belirlenmesi açısından değil, aynı zamanda hâlâ cevaplanamamış bir soru olan yaşamın nasıl ortaya çıktığının aydınlatılması açısından da büyük bir önem taşıyor.

2

Yıldız Tozundan, Yaşama Ev Sahipliği Yapan Gezegenlere

Sıfırdan elmalı turta yapmak için
önce evreni icat etmeniz gerekir.

CARL SAGAN (1980)

EVREN oluşmaya başladığında, genel sıcaklık atomların –bir araya gelip karmaşık biyolojik moleküller oluşturmak şöyle dursun– kararlı olmaları için bile fazlasıyla yüksekti. Yaşam, 13,8 milyar önceki *Büyük Patlama*’nın ardından sıcak, yoğun kozmos genişleyip soğuduğu için var. Atomlar, galaksiler, yıldızlar, gezegenler ve yaşam bu süreçte ortaya çıktı. Şimdi, bu sürecin nasıl yaşam için bir mesken yaratarak yeryüzünü ortaya çıkardığını inceleyelim.

Günümüzdeki evrenin yapısıyla başlayalım, zira mevcut yapısı bize evrenin tarihi hakkında ipuçları sunuyor. Gözlemlenebilir evrenin sınırlarına ulaşan bir yolculuk hayal edin. Işık hızında – saniyede 300.000 km hızla– 384.000 km uzaklıktaki Ay’a ulaşmak için yalnızca 1,3 saniye sürer. Dünya 2,7 mm çapında bir nokta olarak temsil edildiğinde Ay şöyle görünür:



Dünya/Yer



Ay

Bu ölçeği kavramak oldukça kolaydır. Fakat aynı ölçekte Güneş'in 30 cm çapa sahip olduğunu ve onu bu kitaptan 30 metreden biraz uzağa yerleştirmemiz gerektiğini kavramak hayal gücümüzü zorlar. En yakın yıldız olan ve Güneş'e kıyasla küçük kalan Proxima Centauri'nin çapıysa 4 cm olur. Ölçeği bozmamak için onu 8650 km uzağa yerleştirmemiz gerekir, bu mesafe de San Francisco'dan Londra'ya uçuş mesafesine neredeyse denktir.

Işık hızındaki yolculuğumuza devam edersek, Dünya'dan Güneş'e uçmak 8,3 dakika sürerken, sonrasında sekiz gezegenin en dışındaki Neptün'ün ortalama yörüngesel mesafesine seyahat etmek dört saatten biraz uzun sürer. 4,2 yılın sonunda Proxima Centauri'ye ulaşırız. Çok uzun mesafeler söz konusuysa ışık hızında bir yılda kaydedilen mesafeyi –9500 milyar km– *ışık yılı* olarak adlandırırız. Yani Proxima Centauri 4,2 ışık yılı uzaklıktadır.

Güneş ve Proxima Centauri, Samanyolu Galaksisi'nde bulunan 300 milyar yıldızdan ikisidir, 100.000 ışık yılı genişliğindeki bu diskin spiral kollarında yıldızlar yoğunlaşmıştır. Galaksilerin bazıları milyonlarca, bazıları da trilyonlarca yıldız içerir, dolayısıyla Samanyolu büyük sayılabilecek bir galaksidir. Güneş Sistemi, galaksi merkezine galaksinin yarıçapının üçte ikisi kadar bir mesafede bulunan Avcı (Orion) Kolu'nda yer alır. Pek çok yıldız barındıran diğer kollarla kıyaslandığında Avcı hiç de sıradışı görünmez. Ancak Güneş Sistemi'nin galaksinin ücra bir köşesindeki konumunun yeryüzündeki yaşam için hayati önemde olması mümkündür. Dünya patlayan yıldızlara yakın olmak gibi felaketlerden bu sayede kurtulmuş olabilir. Şayet durum buysa, galaksilerdeki belli bölgeler yaşam için daha uygun olabilir. “Galaktik yaşanabilir bölge” olarak adlandırılan bu bölgeleri 7. Bölüm'de tartışacağız.

Daha büyük bir ölçekteyse, gözlemlenebilir evrende gruplara ve süperkümelere ayrılmış 100 milyardan fazla galaksi bulunur. Samanyolu ile bize en yakın (2,5 milyon ışık yılı mesafedeki) spiral galaksi olan Andromeda galaksisi arasındaki 10 milyon ışık

yıllık mesafeyi çap alan bölgede kabaca 50 galaksi bulunur ve *Yerel Grup* denilen galaksi grubunu oluştururlar. Dahası, bu grup 110 milyon ışık yılı çaplı bir kürenin içinde bulunan ve *Virgo Süperkümesi*'ni oluşturan yaklaşık yüz gruptan biridir. Milyarlarca ışık yılını kapsayan haritalar her noktanın bir galaksiyi temsil ettiği küçük dağınık noktalardan oluşan filamentleri gösteriyor. Üç boyutta, insanlığın bildiği en büyük yapı olan galaktik filamentler bir araya gelip geniş boşluklar içeren bir ağ oluştururlar. Bu olağanüstü yapının tamamı sanki çılgın bir intergalaktik örümcek tarafından örülmüşe benzer.

Gözlemlenebilir evren ne kadar büyük? Şayet uzay genişlemiyor olsaydı en uzak mesafe 13,8 milyar ışık yılı olacaktı çünkü 13,8 milyon yıl önce gerçekleşen Büyük Patlama'dan bugüne bir fotonun yani ışık parçacığının katettiği mesafeye eşit olacaktı. Ama uzay genişledi. Dolayısıyla gözlemlenebilir evrenin gerçek boyutu şu anda yaklaşık 47 milyar ışık yılına denk düşüyor. Bu uçsuz bucaksız genişlik astrobiyoloji için önemlidir çünkü yalnızca Samanyolu'ndaki gezegen arayışları bile her yıldızın en az bir gezegene sahip olduğuna işaret eder. Bu gezegenlerin bir kısmı, muhtemelen en az yüzde biri yaşanabilir olmalı, bu da yaşama ev sahipliği yapabilecek gezegenlerin sayısının bir trilyon milyarı geçtiği anlamına geliyor.

Evrenin yapısında Büyük Patlama'dan izler vardır. Amerikalı astronom Edwin Hubble'ın 1920'lerde yaptığı teleskop gözlemleri, aralarındaki uzay genişledikçe galaksilerin hızla birbirinden uzaklaştığını gösterdi. Demek ki zamanda geriye gidilebilseydi her şey sıkışmış ve çok sıcak olurdu. Bu yorum Büyük Patlama için güçlü bir kanıt olarak değerlendirilen bir fenomenin fark edilmesini sağladı: patlamadan artakalan ve tüm evrene sirayet eden, *Kozmik Mikrodalga Arkaplanı* dediğimiz ışıma. Eğer Büyük Patlama doğruysa, fizik yasalarına göre erken evrenin soğumadan önce elektron ve protonlar (atomları oluşturan negatif ve pozitif yüklü parçacıklar), fotonlar (ışık parçacıkları) ve kaynaşmış kü-

çük bir proton grubu içeren opak bir ateş topu olması gerekir. Büyük Patlama'dan 380.000 yıl sonra evren yeterince soğudu ve elektronların protonlarla veya proton gruplarıyla bir araya gelip en küçük iki atomu, hidrojen ve helyumu oluşturabilmelerini sağladı. Bu noktada evren ışığı geçirebilir hale geldi çünkü öncesinde fotonlar serbestçe süzülen elektronlar tarafından saptırılıyorlardı. Önceki bu durum, bir sisin içindeki damlacıklar ışığı farklı yönlere sevk ettiği için sisin ötesini görememeye benziyordu. Evren opaklığını kaybettiğinden beri yaklaşık bin kat genişledi. Büyük Patlama'dan kalma fotonların dalga boyu da aynı derecede genişlediği için fotonlar kırmızı ışıktan mikrodalgaya dönüştüler. Şaşırtıcı bir şekilde, eski bir analog televizyonda veya radyoda kanal ararken karşımıza çıkan cızırtıda, Büyük Patlama'dan artakalan radyasyonun da katkısı vardır, her ne kadar bu katkı yüzde bir gibi düşük bir oranda olsa da. Aslına bakılırsa, mikrodalga arkaplanı 1964'te büyük bir radyo antenindeki gürültü sayesinde keşfedildi. İlk başta antendeki güvercin dışkıları suçlansa da, yapılan temizliğin ve talihsiz güvercinlerin vurulmasının ardından esas suçlunun evrenin başlangıcı olduğu belirlendi.

Galaksiler Büyük Patlama'dan birkaç milyon yıl sonra ortaya çıktı. Ortalamadan biraz fazla materyal olan bazı yerlerde daha çok kütleçekimi vardı. Kümeleşme galaksileri meydana getirdi ve galaksilerin içinde de daha küçük ölçekte gaz bulutları kendi kütleçekimlerinin etkisiyle çöktüler. Gaz parçacıkları birbirine çarpıkça küçülen bulutların iç kısımlarının sıcaklıkları da arttı, sonunda sıcak ve ışıyan bir gaz topuna dönüştüler, yani bir yıldız.

Astrobiyoloji kelimesindeki “astro”nun bir kısmı da, canlı organizmaları oluşturan hidrojen hariç tüm atomların yıldızların içinde yaratılmış olduğu gerçeğinden gelir. İlk yıldızlar yalnızca Büyük Patlama'da ortaya çıkan elementlerden oluşabilirdi; bunların üçte biri hidrojen, geri kalanı da –eser miktarda lityum dışında– helyumdu. Sudaki oksijen, proteinlerdeki azot, tüm organik moleküllerdeki karbon – ilk başta bu elementlerin hiçbiri yoktu.

Ama sonunda yıldızlar onları da oluşturdu.

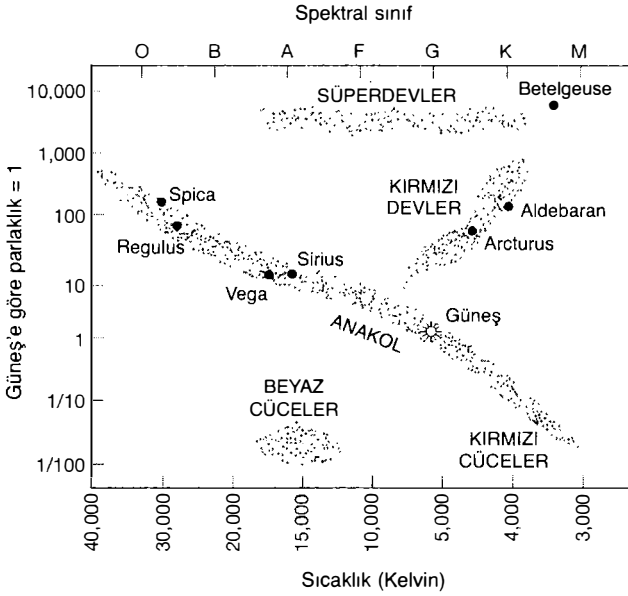
Yıldızların elementleri nasıl oluşturduğunu anlamak için, Güneş'in nasıl parladığını düşünün. Güneş'in içinde çok yüksek bir ısı her atomu bileşenlerine ayırır: pozitif yüklü bir çekirdek ve negatif yüklü elektronlar. Güneş'in merkezindeki 16 milyon santigrat derece sıcaklık, dört hidrojen atomunu birleştirip helyum çekirdeğine dönüştürmek için yeterlidir, bu da foton salımı yapan bir çekirdek tepkimesidir. Daha sonra, her bir foton Güneş'in iç kısmından uzaya doğru bin yıllık bir yolculuğa çıkar. Bu kadar uzun sürmesinin sebebi her fotonun başka maddelerle karşılaşınca sürekli olarak emilip salınmasıdır. Foton aynı zamanda enerji de yitirir. İlk başta yüksek enerjili gama ışınıyken, Güneş'ten kurtulduğunda genellikle görünür ışığın düşük enerjili bir fotonuna dönüşür. Fizikçiler 1950'lerde Güneş'in içinde gerçekleşene benzeyen çekirdek tepkimelerini hidrojen bombalarıyla yeniden gerçekleştirdiler. Güneşimize benzer yıldızların çekirdekleri, üzerlerindeki maddenin ağırlığı yüzünden patlayamayan hidrojen bombaları gibidir.

Güneş'in, çekirdeğinde hidrojen atomlarını birleştirmeyi sonuza dek sürdüremeyecek olması nihayetinde Dünya'daki yaşamın sona ereceği anlamına gelir (bu da astrobiyolojinin "Yaşamın geleceği nasıl olacak?" sorusunu kısmen cevaplar). Yıldız çekirdeklerinin çoğunda helyum "külünün" birikimi, sıcaklığın hidrojen füzyonunu daha fazla desteklemeyecek kadar düşmesine neden olur. Bu noktada, yıldız kendi ağırlığı altında büzülür ve bu da sıcaklığın çekirdeği çevreleyen kabukta hidrojen füzyonu tetikleninceye dek artmasına neden olur. Enerji salımı yıldızın dış katmanlarının genişlemesine, soğumasına ve kızıllaşmasına neden olur. İşte *kırmızı devler* böyle oluşur, Taurus (Boğa) takımyıldızının en parlak yıldızı Aldebaran gibi. 7,5 milyar yılın sonunda Güneş'in de şimdiki büyüklüğünün iki yüz katına erişip bir kırmızı dev olacağı, belki de Dünya'yı yutacağı tahmin ediliyor. Daha da çok biriken helyum külü kırmızı devin çekirdeğini iyice sıkış-

tırıp sıcaklığı 100-200 milyon santigrat dereceye yükseltecektir, bu da helyum atomlarının birleşerek karbon ve oksijen oluşturmaları için yeterlidir. Nihayetinde, helyum yakan kabuk karbon ve oksijen külünden oluşan bir çekirdeği sarmalar hale gelebilir. Kütleli Güneş'in dört ila sekiz katı olan yıldızlar karbon ve oksijeni kaynaştırıp neon ve magnezyum gibi daha ağır elementler bile oluşturabilirler.

Genellikle, Güneş benzeri yıldızların ölüm sancıları sırasında dış katmanları uzaya atılır. Bu ışıyan gaz kabukları *gezegenimsi nebula* olarak adlandırılır çünkü düşük büyütme gücüne sahip teleskoplarda gezegenmiş gibi görünürler ama aslında gezegenlerle hiç alakaları yoktur. Yıldızdan geriye kalanlar soğuyarak *beyaz cüceye* dönüşür, bu cismin yarıçapı Dünya'ya yakın olsa da yoğunluğu çok büyüktür. Teorik olarak, bir beyaz cücenin on ila yüz milyar yıl sonra parlamayı bırakıp bir *kara cüceye* dönüşmesi gerekir. Ancak evren henüz o kadar yaşlı değil.

Güneş'in kütesinin sekiz katından daha büyük bir kütleyle sahip olan yıldızlar sonunda *süpernova* olarak patlarlar. Güneş on milyar yıllık hidrojen füzyon fazının yarısına ulaşmak üzere, ama bu devasa yıldızlar kırmızı süperdevlere dönüşmeden önce aynı evrede 60 milyon yıldan az zaman geçirirler. Bunun bir örneği de Avcı takımıyıldızındaki Betelgeuse'dür. Bu yıldızlarda çekirdeğin etrafındaki kabukta gerçekleşen nükleer füzyon neon, magnezyum, silisyum ve demir elementlerini üretir. Oluşan elementlerin en ağırı genelde demir olsa da, halihazırdaki çekirdeklere serbest nötronlar katılırsa daha ağır elementler de üretilebilir. (Nötronlar elektriksel yüke sahip olmayan parçacıklardır ve atom çekirdeğinde yaygın olarak bulunurlar.) Bu yıldızların yakıtı bittiğinde çekirdek o kadar sıkışır ki, negatif yüklü elektronlar demir çekirdeğindeki pozitif yüklü protonlarla birleşir. Elektrik yükleri birbirini sıfırlar ve yüksüz nötron parçacıkları oluşur. Sonuç olarak, yıldızın çekirdeği 12 km çapa ulaşacak kadar büzülür, yalnızca nötronlardan oluşan devasa bir atom çekirdeğine benzeyen bir ya-



Şekil 1. Güneş ve yakınlarındaki yıldızları gösteren Hertzsprung-Russell diagramı. Sıcaklık değerleri Kelvin olarak gösterilmiştir. Kelvin, Santigrat derecenin 237 fazlasına eşittir. Tüm moleküler hareketlerin durduğu sıcaklık olan “mutlak sıfır”, 0 Kelvin’e eşittir.

pı oluşturur. Bu büzüşme yüzünden yıldızın geri kalanı yoğun nötron çekirdeğinin üstüne çöker ve şiddetli bir geri tepme inanılmaz derecede parlak süpernovayı oluşturur.

Demirden daha ağır elementler süpernovalar tarafından üretilir ve yayılır. Bir süpernovadan birkaç saniye sonra, yıldızın dış katmanları 10 milyar santigrat derecelik inanılmaz bir sıcaklığa erişirken, daha derin katmanlardaki çekirdeğin parçalanması ağır elementleri oluşturan tepkimelere bol miktarda nötron yakıtı sağlar. Kozmik simya altın, gümüş ve platin gibi ağır, değerli elementleri yaratır. Önemli bir nokta da şu ki, süpernovadan atılan materyaller yeni nesil yıldızların ve yaşama mesken sunan gezegenlerin temelini oluşturur. Yıldızların Güneş’in kütlelerinin onlarca katına eriştiği

durumlarda yine bir süpernova oluşsa da, merkezdeki çöküş bir kara delik oluşturur – bu cisim o kadar büyük bir kütleyle sahiptir ki kütleçekiminden hiçbir şey kaçamaz, ışık bile.

Bir yıldızın çekirdeğindeki hidrojeni helyuma çevirdiği evre *anakol ömrüdür*, bu evre yıldızların çevresinde yaşamın gelişebilmesi için en uygun aralık olarak kabul edilir genellikle. “Anakol”, astronominin en ünlü grafiği olan Hertzsprung-Russell (H-R) diyagramında (Şekil 1) sol üstten sağ alta uzanan diyagonal kuşağı işaret eder. Grafik bir yıldızın parlaklığının (lüminozitesinin) yüzey sıcaklığıyla ilişkisini gösterir. Astronomlar “yüzey” tabiriyle sert bir yüzeyi değil yıldızın atmosferinde en fazla ışığın görüldüğü seviyeyi kastederek, zaten bunun ötesini de göremeyiz.

Sıcaklık eksenini H-R diyagramında tuhaf bir şekilde ters yönde, yüksekten düşüğe doğru ilerler. Bununla amaçlanan, yıldızların sıcak mavi-beyaz yıldızlardan daha soğuk kırmızılara giden renk kodlamasını O, B, A, F, G, K ve M harfleriyle eşleştirmektir. Harfler yıldızın spektral sınıfını belirtir. (Bu harflerin hiçbir anlamı yoktur ve kökenleri bizi ilgilendirmeyen on dokuzuncu yüzyıl astronomisine dayanır.)

En ağır yıldızlar anakolun sol üstünde yer alırken en hafifler sağ altta yer alır. Kütleleri ne olursa olsun bir anakol yıldızı her zaman cüce olarak adlandırılır. Örneğin Güneş bir G-tipi cücedir. Soğuk kırmızı cüceler için anakol ömrü 50 milyar yıldan fazla olabilir.

Yıldızların “yaşama” ve “ölme” biçimleri astrobiyoloji için çeşitli nedenlerle önem taşır. Güneşimiz orta yaşlı bir anakol yıldızıdır ve sağladığı daimi ışık Dünya üzerindeki yaşama fotosentez için yakıt sağlar. Daha önce de bahsettiğimiz gibi, yaşamın atomları kırmızı devlerde ve süperdevlerde üretilir. Ayrıca, helyum çekirdeklerinin tamsayı katlarından oluşan oksijen, silisyum, magnezyum ve demir, nükleer füzyonun en yaygın ürünleridir; bu da önemli bir olgudur çünkü bu elementler kayaları oluşturur. Yaşadığımız gezegen gibi kayalık gezegenler yıldız ışığı fiziğinin

doğal sonucudur. Güneş'in en azından ikinci kuşak bir yıldız olduğunu da biliyoruz çünkü Dünya'da altın gibi süpernova elementleri de bulunuyor. 13,2 milyar yıl yaşındaki Samanyolu'nda Güneş yalnızca 4,6 milyar yaşında olduğu için, Dünya'da yaşam ortaya çıkmadan önce evrende pek çok yıldız oluştu ve yok oldu. Daha eski yıldızlar gezegenleri ve yaşamı, hatta akıllı yaşamı destekledi mi? Peki sonra onlara ne oldu? Bunlar bizi kendi gezegenimizin nasıl oluştuğu sorusuna getiriyor.

Yaşayacak Bir Yer Bulmak: Gezegenler Nereden Gelir?

Güneş Sistemi'nin kökenine ilişkin fikirlerin uzun bir geçmişi vardır. 1755'te Immanuel Kant Güneş Sistemi'nin uzayda yayılmış bir bulutun bir araya gelmesiyle oluştuğunu öne sürdü. Daha sonra 1796'da Laplace Markisi ve matematikçi Pierre Simon bu fikri geliştirdi. Temel Kant-Laplace varsayımı “nebula (bulutsu) hipotezi” olarak da bilinir, *nebula* Yunancada bulut anlamına gelir.

Hipotez, başlangıçta bulutun bazı kısımlarının diğerlerinden biraz daha yoğun olduğunu ve kütleçekimiyle maddeyi kendine çektiğini öne sürer. Bulutun başlangıçta hafif bir rotasyona sahip olması da muhtemeldir, böylece büzüşen bulut daha da hızlı döner, tıpkı kollarını vücuduna yaklaştıran bir buz patenci gibi. Gaz ve tozun rasgele hareketi, çekilen maddeye dönüş ekseni boyunca engel olurken, dönüşün etkisi de dönüş düzlemindeki maddeye karşı koyar. Sonuç olarak bulut düzleşerek bir diske dönüşür. Güneş merkezde oluşurken, az miktardaki madde de disk düzlemindeki gezegenleri oluşturmak için bir araya gelir. Gezegenlerin kütlelerinin Güneş'inin yalnızca yüzde 0,1'i olması da bu görüşü destekliyor. Bir diskten meydana geldikleri için gezegenlerin tümü aynı düzlemde yer alır ve Güneş'in etrafında aynı yönde dönerler. Nitekim gözlemler de bunu gösteriyor.

Geçtiğimiz onyıllarda, izotoplardan gelen kanıtlar göz önünde bulundurularak, yakınlardaki bir süpernovadan gelen şok dalgası-

nın nebulanın çökmesine neden olduğu düşünülüyordu. İzotoplar çekirdeklerinde aynı sayıda proton ve farklı sayıda nötron bulunduran atomlardır. Kelimenin Yunanca kökeni olan *isos topos* “eş yer” anlamına gelir, bu da elementlerin periyodik tabloda aynı yerde olduklarına işaret eder. Bazen bir izotopun çekirdeği kararlı olmayacak kadar büyüktür ve radyoaktif bozunma ile parçalanır. Kararsız bir alüminyum-26 atomu (26 parçacıktan oluşan bir çekirdeği vardır: 13 proton + 13 nötron) bozularak kararlı bir magnezyum-26’ya (12 proton + 14 nötron) dönüşür. Bir alüminyum-26 numunesinin yarısının magnezyum-26’ya dönüşmesi için gereken zaman yani *yarı ömür* 700.000 yıldır. Bazı meteoritlerde, alüminyum-26’dan görece yakın zamanda üretilmiş olması gereken magnezyum-26’nın bulunması, Güneş Sistemi oluştuğunda yakınlarda bir süpernova olduğuna işaret eder çünkü devasa yıldızlar alüminyum-26 üretir ve süpernovaları da bu izotopu etrafa dağıtır.

Öte yandan 2012’de meteoritlerde yapılan yeni ölçümlerin sonucunda, yalnızca süpernovalarda oluşan bir izotop olan demir-60 seviyesinin, yakınlarda bir süpernova bulunduğu fikrini çürütecek kadar düşük olduğu görüldü. Yüksek miktardaki alüminyum-26’yı açıklamak için yakınlardaki devasa bir yıldızın, (belki de Güneş’in yirmi katı kütleyle sahip) bir Wolf-Rayet yıldızının dış katmanlarını atıp Güneş nebulasına alüminyum-26 yaymış olabileceği görüşü ortaya atıldı. İlk birkaç milyon yıl boyunca Güneş nebulasının baskın ısı kaynağı alüminyum-26’ydı. İlk dönemlerde oluşan kayamsı maddenin içindeki buzu eriten alüminyum-26, suyun buz olarak kalıp buharlaşmak yerine güvende olacağı hidratlı minerallerin içine girmesine neden olmuştu. Eğer alüminyum-26 olmasaydı, Dünya su yönünden zengin minerallere, okyanuslara ve yaşama sahip olamayacaktı belki de.

Nebula hipotezi farklı türde gezegenlerin geniş dağılımını açıklar. Güneş Sistemi’nin iç kısmındaki gezegenler (Merkür, Venüs, Dünya ve Mars) görece küçük ve kayalıkken, dış kısımdaki gezegenler (Jüpiter, Satürn, Uranüs ve Neptün) devasa boyuttadır.

Disk oluşurken içeriye çekilen maddeler hareket enerjisi kazanırken, diskin merkezi Güneş'in oluşmasıyla beraber aşırı derecede ısınmıştı. Bu durum sıcak merkezden soğuk dış kısma uzanan bir sıcaklık skalasına neden oldu. Güneş'in dışında basınç düşüktü, bu da maddelerin sıvı değil katı ya da gaz halde bulunduğu anlamına geliyordu. Diskin iç kısmında, sıcaklık su buharı gibi gazların buz oluşturabilmesi için fazla yüksekti ama metal ve kaya buharı diskin neredeyse her yerinde yoğunlaşıyordu. Sonuç olarak, iç kısımda oluşan örneğin Dünya gibi gezegenler kayalık bir kabukla çevrili demir zengini birer çekirdeğe sahip oldular. Buna karşılık, Jüpiter'in yörüngesinin hemen içinde ("buz hattı") ve dışında sular buza dönüştü ve daha büyük gezegenlerin oluşumu için malzeme sundu. Metan da Neptün'ün yörüngesinin dış tarafından itibaren buza dönüşerek katılaşabildi.

Dev gezegenlerin kayalık olanlardan daha önce oluştuğu düşünülüyor. Jüpiter ve Satürn muhtemelen, yaklaşık on Dünya kütleline ulaşmış yeterince kütleçekimine sahip olan kayalık çekirdeklerin diskten giderek daha fazla hidrojen ve helyum gazı çekmesi (ve nihayetinde yörüngede bu maddelerin tükenmesi) ile oluşmuş olmalı. Jüpiter ve Satürn'ün bu şekilde meydana gelmiş olması muhtemel. Çoğunlukla gazdan oluşan devasa küreler oldukları için bu gezegenleri gaz devleri olarak adlandırıyoruz. Bu süreç Güneş'in oluşmasının ardından yaklaşık 10 milyon yıl içinde gerçekleşti. Daha küçük olan Uranüs ve Neptün daha büyük oranda buzlaşmış katılar içerir, bu yüzden de onları buz devleri olarak adlandırıyoruz. Jüpiter'in hızlı büyümesinden farklı olarak, iç kısımlardaki kayalık gezegenlerin oluşma süreci 100 ila 200 milyon yıla yayılmıştır. Gezegenimsiler (gezegen parçaları) bir araya gelip Ay ile Mars arasında bir büyüklüğe sahip olan daha büyük kayalık cisimleri (gezegen embriyolarını) oluşturdular. Birkaç gezegen embriyosu birleşip Venüs ve Dünya'yı oluştururken, daha az sayıdaki embriyo da Merkür ve Mars'ı oluşturdu.

İç gezegenler kendi yakınlarındaki materyalleri biriktiriyordu,

ama dev gezegenlerin, özellikle de Jüpiter'in kütleçekim gücü gezegen parçacıklarını Güneş Sistemi'nin iç kısmına yöneltiyordu. Mars yörüngesinin ötesinden gelen hidratlı asteroitlerin bu şekilde saçılması, Dünya'ya suyun gelmesinden ve sonrasında okyanus ve göllerimizin oluşmasından sorumlu olmalı. Yani içtiğimiz su asteroit suyu. Bilgisayar simülasyonları Jüpiter'in içe doğru saçtığı miktardan daha fazla suyu dışarı attığını gösteriyor; bu da demek oluyor ki, eğer Jüpiter daha az dairesel bir yörüngeye sahip olsaydı ve daha fazla su zengini materyali dışarı atsaydı Dünya okyanuslardan ve yaşamdan mahrum kalabilirdi.

Gezegenlerin her zaman yörüngelerinde kalmadıklarını da biliyoruz. *Sıcak Jüpiterler* denen gezegenler, Jüpiter'e benzer bir kütleyle sahip olan ve yıldızlarına Dünya'nın Güneş'e olduğundan en az iki kat daha yakın bir mesafede bulunan ötegezegenlerdir. Bu ötegezegenler şu an bulundukları konumlarda oluşmuş olamazlar çünkü bu konumlar onların oluşması için fazla sıcaktır. Görünüşe göre, oluşumlarına eşlik eden nebuladaki büyük gaz ve toz "kuyrukları" ve diğer cisimlerin kütleçekim etkileri nedeniyle gezegenler yer değiştirebiliyorlar. Dolayısıyla geleneksel nebula hipotezine, Güneş Sistemi dışındaki gezegenlerin yaşama elverişli olmasını engelleyebilen ya da kolaylaştırabilen *gezegen göçü* etkeni ekleniyor. Bir sonraki bölümde, Güneş Sistemimizdeki dev gezegenlerin bile göç etmiş olması ihtimali üzerinde duracağız.

Ne olursa olsun nebula hipotezinin temel fikri –yani gezegenlerin bir diskten oluşmuş olması– 1980'lerde genç yıldızların etrafındaki disk biçimli kalıntıların teleskoplarla tespit edilmesiyle doğrulanmış oldu. Aslında kendi Güneş Sistemimizde de hâlâ kalıntılar vardır. Başka cisimlere dahil olmayan buzlu cisimler kuyrukluysıldızları oluştururken kaya parçaları da asteroitleri oluşturur. Bazen çarpışmalar sonucunda asteroitlerden kopan küçük parçalar meteorit olarak Dünya'nın yüzeyine düşerler. Dolayısıyla meteoritler bize Güneş Sistemi'nin ilk zamanları hakkında önemli veriler sunar.

Dünya ve Ay'ın Yaşı

Meteoritlerden edindiğimiz belki de en aydınlatıcı bilgi Dünya'nın ve Güneş Sistemi'nin yaşıdır. On sekizinci yüzyıldan bu yana, gözlemledikleri geniş tortul kayaç katmanlarında yaptıkları gözlemler jeologları Dünya'nın ve dolayısıyla Güneş Sistemi'nin oldukça yaşlı olduğunu düşünmeye sevk etmişti, ancak ellerinde kanıt yoktu.

Dünya'nın yaşını ölçme girişiminde bulunan ilk kişi olan İngiliz jeolog Arthur Holmes, radyoaktif uranyumdan oluşan kurşun izotoplarını incelemeyi düşünmüştü. Uranyum-238 kademeli olarak kararsız izotoplar üreterek bozunur ve en sonunda kararlı bir kurşun izotopuna, kurşun-206'ya ulaşır. Uranyum-238'in kurşun-206'ya ulaşma yarı ömrü 4,47 milyar yıldır. Bir başka radyoaktif izotop olan Uranyum-235'in kurşun-207'ye dönme yarı ömrü ise 704 milyon yıldır. Dolayısıyla farklı kaya parçalarındaki kurşun-207 ve kurşun-206 miktarlarını ölçerek bir kayanın yaşını belirlemek mümkündür, çünkü her ne kadar kayalardaki uranyum miktarı değişkenlik gösterse de bozunma hızlarının sabit olması kurşun-206'nın kurşun-207'ye oranının belirli bir zaman aralığında sabit kalmasını sağlar. 1947'de Holmes Grönland'daki bir kurşun cevherinde yöntemini uyguladı ve Dünya'nın 3,4 Ga önce (Ga “milyar yıl” anlamına gelen “giga annum”un kısaltmasıdır) oluştuğunu hesapladı.

Holmes'un iki sorunu vardı. Birincisi, bulabildiği en eski taşın bile Dünya'nın kendisi kadar yaşlı olduğundan emin olmak imkânsızdı. İkincisi, kesin yaşı belirleyebilmek için Holmes kurşun izotoplarının Dünya olduğu zamanki oranını bilmek durumundaydı. Daha sonraki uranyum bozunmalarının daha çok kurşun atomu eklemesinden önceki bu ilk kurşun izotoplarına “ilksel kurşun” adı verilir. Amerikalı jeokimyacı Clair Patterson birinci sorunun meteoritlere bakılarak çözülebileceğini fark etti, çünkü

onlar Dünya ile yaklaşık aynı zamanlarda oluşmuş artık yapı malzemeleriydi. Patterson ayrıca, demir meteoriti olarak adlandırılan belirli türdeki meteoritlerin ihmal edilebilir miktarda uranyum içerdiğini, dolayısıyla da onlardaki kurşun izotopları oranının “ilksel kurşun” oranı olarak kabul edilebileceğini de fark etti. Bu yaklaşım sayesinde Patterson 1953’te Dünya’nın yaşını doğru biçimde 4,5 Ga olarak belirledi. O kadar heyecanlanmıştı ki kalp krizi geçirdiğini sanmıştı, annesi de onu hastaneye götürmek zorunda kalmıştı.

O zamandan günümüze, radyoaktif izotop temelli tekniklerin daha da gelişmesi bize Dünya’nın oluşumunu çevreleyen olayların zaman çizelgesini sundu. Meteoritlerdeki en eski tanecikler Güneş Sistemi’nin 4,57 Ga önce oluştuğunu gösteriyor. Dünya biraz daha sonra, 4,54 Ga önce oluştu. Ardından, yaklaşık 4,5 Ga önce Dünya’ya Mars büyüklüğünde bir cisim çarpmış olmalı. Bu cisme Ay tanrıçası Selene’yi doğuran Yunan tanrıçası *Theia*’nın adı verildi. Bu *dev çarpışma hipotezine* göre, çarpışmadan sonra ortaya çıkan artıklar Dünya’nın çevresinde dönmeye başlayıp daha sonra bir araya gelerek Ay’ı oluşturdular.

Ay astrobiyoloji için önemlidir çünkü onun kütleçekimi Dünya’nın ekseninin yörünge düzlemine göre eğiminin sabit kalmasını sağlar, bu da Dünya’nın nispeten istikrarlı bir iklime sahip olmasına yardımcı olur. Şu anda Dünya’nın ekseni 23,5 derece eğik, ama eğer bu eğim büyük değişkenlikler gösterseydi büyük iklimsel değişiklikler de gözlenirdi. Örneğin 90 derecelik bir eğimde Dünya yana yatmış olur ve ekvatorda mevsimlik buzlanma görülürdü. Bilgisayar simülasyonları gösteriyor ki, eğer Ay olmasaydı Dünya’nın ekseni milyonlarca yıllık periyotlarla kaotik biçimde değişecek ve 0 dereceden 50 derecenin üstüne kadar uzanan geniş bir aralıkta seyredecekti. Mikrobiyal yaşam muazzam iklim değişikliklerine büyük ihtimalle dayanabilirdi, ama gelişkin hayvan yaşamı ve bizimki gibi uygarlıklar büyük zorluklarla karşılaşırdu.

Astronomik patikamızda artık yaşam için bir meskenin ortaya çıktığı noktaya, yani gezegenimize ulaştık. Yaşam için gerekli olan suyun Dünya'ya dışarıdan gelip gelmediği ve Dünya benzeri bir gezegenin nerede oluşabileceği gibi belirsizlikler var ortada. Bir de, Dünya oluştuktan sonra yaşamın ne zaman ve nasıl ortaya çıktığı sorusu.

Yaşamın ve Çevrenin Kökenleri

Dünya'nın İlk Dönemleri

Dünya tarihinin en erken dönemine dair o kadar az şey biliniyor ki bu dönemin resmi bir adı bile yok. Gayriresmi olarak *Hadeyan* denilen bu dönem, Ay'ın oluştuğu zamanlarda (4,5 Ga önce) başlayıp henüz üzerinde hemfikir olunmamış bir tarihte ama genellikle 3,8 veya 4 Ga önce sonlandırılır. Yaşamın Hadeyan döneminde ortaya çıkmış olması muhtemeldir, ancak şimdiye dek o döneme ait tortul kayaçları bulamadığımız için buna dair bir kanıtımız yok. Bu kayaçlar sudan veya havadan gelen tortu parçacığı katmanlarından oluşur, bu yüzden de biyolojik veya çevresel izlerin en iyi şekilde korunmasını sağlarlar. Dolayısıyla Hadeyan sırasında ne olduğuna ilişkin fikirlerimizi az miktarda veri ve teorik kısıtlamalarla inşa etmek durumundayız.

Teori, Ay'ın oluşmasını sağlayan büyük çarpışmanın ortaya çıkardığı ısıнын kayaları gaza dönüştürmüş olması gerektiğini öne sürüyor. Buharlaşmış kaya atmosferinin birkaç bin yıl varlığını sürdürdüğü, sonrasında yoğunlaşarak erimiş magma yüzeyin üzerine yağdığı, en nihayetinde de kabuk şeklinde katılaştığı düşünülüyor. Ardından, atmosfer birkaç milyon yıl boyunca aşırı derecede yoğun bir buhar halini korumuş, sonrasındaysa yoğunlaşarak okyanusları oluşturmuş olmalı.

Kıtalar ne zaman oluşmaya başladı? Yeryüzü tarihinin ilk yarım milyar yılından kalma, 0,5 mm'den küçük bir çapa sahip olan mineral kırıntılarından bazı ipuçları elde edebiliriz. Bunlara *zir-konlar* diyoruz, $ZrSiO_4$ formülüne sahip olan zirkonyum silikat kristalleri. Formüldeki Zr Zirkonyumu, Si Silisyumu ve O Oksijeni temsil eder. Zirkonlar o kadar sağlamdır ki, bir zamanlar içinde oldukları kaya ufalanıp gitse bile aynı kalmaya devam ederler. Batı Avustralya'daki Perth şehrinin kuzeyindeki Jack Tepeleri'nde bulunan fosilleşmiş çakıllarda, 4 ila 4,4 Ga yaşında zirkonlar keşfedildi. Zirkonların içinde kuvars tanecikleri bulunur. Kuvars silikanın (SiO_2) kristalleşmiş formudur. Kuvars, kıtaların büyük kısmını oluşturan silika zengini magmatik bir kayaç olan granitten türemiş olabilir. Bu bağlamda, zirkonlar Dünya'nın kıta kabuğunun 4,3 Ga kadar eskiye gittiğine işaret eder. Bazı antik zirkonlar kararlı oksijen-16'ya kıyasla kararlı oksijen-18 bakımından zengindir. Bu zenginleşmenin nedeni, yüzey suları tarafından oluşturulan kil ve çamurun yeraltına gömülüp erimesi sonucunda izotopik imzanın magmatik kayaçlara geçmesidir.

Güneş Sistemi'nin oluşumundan kalma birkaç büyük parça Hadeyan döneminde Dünya'ya çarpmış olmalı, ancak bunların hiçbiri Ay'ın oluşmasına neden olan çarpışma kadar büyük değildi. Ender görülen devasa çarpışmaların enerjisi bütün bir okyanusu veya onun birkaç yüz metrelik kısmını buharlaştırabilecek büyüklükteydi. Böyle bir durumda yaşamın sil baştan başlaması gerekirdi veya yalnızca ısıya rağmen hayatta kalabilen, yeraltına sığınmış mikrolardan ibaret kalırdı. Aslına bakılırsa, yeryüzündeki yaşamın son ortak atası Dünya'yı kısmen sterilize eden etkilerle açıklanabilir. Genetikçiler ortak atamızın izini bir termofile –sıcak ortamlarda yaşayan bir mikroba– kadar sürer (bkz. 5. Bölüm). Temel olarak, DNA analizi “büyük-büyük-büyük... büyükannenizin” bir termofil olduğuna işaret eder, tabii eğer boşluklara yeterince “büyük” eklerseniz. Bunun nedeni devasa çarpışmalardan yalnızca termofillerin kurtulabilmesidir.

Günümüzde Dünya, potansiyel felaketlerden tamamıyla azade değil. Örneğin, Chiron adındaki 230 km çaplı kuyruklu yıldız benzeri nesne Güneş Sistemi'nin dış kısımlarında bulunuyor ve Satürn'ün yörüngesinden geçiyor. Önümüzdeki 10 milyon yıl içinde bir gün, Satürn'ün kütleçekimindeki ufak bir değişiklik Chiron'u ya Güneş'e ya da Güneş'ten uzağa doğru yönlendirecek. İlk durumda Chiron'un Dünya'ya çarpma olasılığı milyonda birden daha az olacak. Ama eğer Chiron çarparsa, ısı okyanusun üstündeki birkaç yüz metrelik su kitlesini buharlaştıracak ve toprak yaklaşık elli metrelik derinliğe kadar sterilize hale gelecek. Termofiller bir çeşit evrimsel *déjà vu* sonucunda bundan sonraki yaşamın ataları haline gelecekler, tabii eğer termofil atalarımıza dair çarpışma açıklaması doğruysa.

Büyük Hadeyan çarpışmasının son gösterisi *Geç Dönem Ağır Bombardıman* olarak bilinir ve yaklaşık 4 ila 3,8 Ga önce gerçekleşmiştir. Ay'ın kraterleri bu büyük bombardımanın tanığıdır. *Apollo* uzay mekiğindeki astronotların getirdiği kayaların yaşının radyoizotoplarla belirlenmesi sonucunda, pek çok kraterin aynı 200 milyon yıllık aralık içinde oluştuğu tespit edildi.

Geç Dönem Ağır Bombardıman'ı açıklayan ve en çok kabul gören hipotez, Fransa'nın Nice şehrindeki astronomlar tarafından öne sürüldü, bu yüzden de *Nice modeli* olarak adlandırılır. Bu hipotez Hadeyan'ın sonunda Jüpiter ve diğer dev gezegenlerin yörüngelerinin kaydı gibi hayret verici bir fikre dayanır. Hesaplamalar, Güneş Sistemi'nin oluşmasının ardından ortak kütleçekim etkilerinin Satürn ve Jüpiter'i "rezonans" adı verilen bir duruma ulaştırdığına ve bu rezonans durumunda Jüpiter'in Güneş etrafında her dönüşünde Satürn'ün iki dönüşünü tamamladığına işaret ediyor. Düzenli diziliş periyodik kütleçekim etkilerine neden olarak Satürn ve Jüpiter'in yörüngelerini daha az dairesel hale getirdi. Bunun sonucunda da Neptün ve Uranüs'ün yörüngeleri de düzensizleşip dışa doğru kaydı ve onlar da daha eliptik hale geldi. Hatta Neptün yolculuğuna Uranüs'ün yörüngesinin içinde başla-

miş ve daha sonra dışarıya kayarak daha dış çepere yerleşmiş bile olabilir. Başta daha uzaktaki olmak üzere iki gezegen de küçük buzlu nesneler saçmış ve bunların bazıları Güneş Sistemi'nin içlerine gitmiş olmalı. Bu sırada, Jüpiter'in kütleçekimi ve hareketi de bazı asteroitleri Güneş Sistemi'nin içlerine yönlendirip geri kalkanları da uzaklaştırmış olmalı. Tüm bunlar olurken, daha büyük boyuta ve kütleçekimine sahip olduğu için Dünya'nın Ay'a kıyasla çok daha fazla çarpışmaya maruz kalmış olması gerekir. Ortalık kasıp kavurduktan sonra, dev gezegenlerin yörüngeleri nihayet sabitlenmiş olmalı.

Yaşamın Kökeni

Yaşamın nasıl ortaya çıktığı tam olarak bilinmiyor. Dünya üzerinde ortaya çıkmış olabilir veya uzay tozları ya da meteoritlerle buraya taşınmış olabilir. İkinci fikir *panspermia* olarak adlandırılır ve yaşamın ortaya çıkışı sorununu çözmayip onu başka bir yere havale eder. Dahası, uzun yolculuk sürelerinin hayatta kalmayı zorlaştırması da yaşamın başka yıldızlardan yeryüzüne geldiği tezi için sorun teşkil eder. Bu yüzden burada yaşamın yeryüzü kökenli olduğu savına yoğunlaşacağız.

Yaşamın ortaya çıkışından önce bir kimyasal evrim döneminin varlığı konusunda yaygın bir uzlaşma vardır; *prebiyotik kimya* denilen bu evrede basit organik moleküllerden daha karmaşık olanlar üretildi. Bu fikir on dokuzuncu yüzyıla kadar uzanır. Charles Darwin botanikçi Joseph Hooker'a 1871'de yazdığı mektubunda böyle bir kimyanın “küçük ılık bir gölette” ortaya çıkmış olabileceğini hayal ediyordu.

Canlı bir organizmanın oluşması için gereken, geçmişte görülmüş olabilecek tüm koşulların halihazırda da var olduğu sık sık söylenir. Ama içinde her türlü amonyum ve fosfor tuzlarının yanı sıra ışık, sıcaklık, elektrik gibi koşulların da bulunduğu küçük ılık bir gölette bir protein bileşiğinin oluştuğunu hayal edebilirsek eğer (ki çok büyük bir

“eğer”dir bu!), günümüzde böyle bir madde hemen tüketilir veya absorbe edilirdi, oysa canlı varlıklar oluşmadan önce böyle olmazdı.

Böylece Darwin günümüzde yaşamın ortaya çıkmasının pek mümkün olmadığı çünkü organizmaların gerekli kimyasal bileşenleri sürekli tükettiği sonucuna varmıştı. Öte yandan, yaşam ortaya çıkmadan önce yaşamın kökeni için gerekli kimyasal koşullar yaygın olmalıydı.

1920’lerde hem Rus biyokimyacı Alexander Oparin hem de Britanyalı biyolog J. B. S Haldane yaşamın ortaya çıktığı ortamda oksijen bulunmadığının farkına vardı. Dünya’nın oksijen zengini atmosferi bitkiler, algler ve bakterilerin yaptığı fotosentezin bir sonucudur. Oksijensiz bir atmosfer prebiyotik kimya için daha uygundur çünkü oksijen organik maddeyi karbondioksite dönüştürerek karmaşık moleküllerin birikmesini engeller. Gerçekten de, onlarla aynı dönemde yaşamış olan jeolog Alexander MacGregor 1927’de bulduğu Arkeyan Devir’den (3,8-2,5 Ga öncesinden) kalma tortul kayaçların eski atmosferde oksijen bulunmadığını gösterdiğini ortaya koydu. MacGregor, Zimbabwe’de bulunan demir minerallerinin modern tortul kayaçlardan farklı olarak oksitlenmemiş olduğunu gözlemlemişti; modern tortul kayaçlarda ise atmosferdeki oksijenin demir içeren minerallerle tepkimeye girmeyle oluşan pas renginde demir oksitler vardır. Günümüzde, MacGregor’un akıl yürütmesi pek çok veriyle de destekleniyor (4. Bölüm).

Oparin ve Haldane, Dünya’nın erken atmosferindeki gazların morötesi güneş ışığı veya yıldırımlar tarafından organik moleküllere dönüştürüldüğünü de öne sürdüler. Bu fikirler, Nobel ödüllü kimyacı Harold Urey’in öğrencisi Stanley Miller tarafından 1950’lerde Chicago Üniversitesi’nde gerçekleştirilen bir deneyde sınandı. Amonyak, metan, hidrojen ve su buharı karışımı bir cam kabın içine kondu ve bu gazın içinden yıldırımı simüle eden bir elektrik akımı geçirildi. Miller cam şişenin tabanında sarımsı bir suyun yoğunlaştığını gözlemledi. Bu koyu renk kalıntıda proteinlerin

yapıtaşı amino asitlerin de aralarında bulunduğu organik moleküller vardı. O günlerde, basın Miller-Urey deneyinin yaşamın kökeni sorununu kati surette çözdüğünü yazıp çiziyordu. Yaşamın atmosferik kimyanın oluşturduğu bir “ilksel çorbada” başladığı söyleniyordu. Miller 1953’te sonuçlarını yazarken (Oparin ve Haldane’e kadar giden) yaygın görüş genetik materyalin protein olduğuydu, ancak Miller’ın makalesi yayımlanmadan bir ay önce, kalıtımın gerçek temelini DNA olduğu tespit edildi. Daha sonra, Miller-Urey benzeri deneylerde karbon, azot ve hidrojen atomlarının altıgen halkalarını içeren moleküller de üretildi. Bunlar DNA’da bulunan türden halkalardır.

Ne var ki jeokimyacılar Miller-Urey deneyine şüpheyle yaklaşıyorlar çünkü Dünya’nın erken dönem atmosferinin büyük ihtimalle Miller’ın varsaydığı kadar hidrojen zengini olmadığını öne sürüyorlar. Volkanlar Dünya’nın atmosferini uzun süreler boyunca gazlarla besler, volkanik gazların çoğu buhardır, ortalama yüzde 1’den az hidrojen (H_2) içeren su buharı (H_2O) gibi. Benzer şekilde, volkanik karbon, karbondioksit (CO_2) olarak açığa çıkar, hidrojenize olmuş metan (CH_4) olarak değil; azot ise dinitrojen (N_2) olarak salınır, amonyak (NH_3) olarak değil.

Hadeyan atmosferinin büyük ölçüde volkanlardan salınan gazlardan oluştuğu düşünülüyor, o yüzden de hava ağırlıklı olarak CO_2 ve N_2 içermeliydi. Elbette bu, ne kadar geriye gittiğinize göre değişir. Dünya oluşurken, yeryüzüne çarpan büyük cisimler eğer yeterli miktarda demir içeriyor ve çarpışma patlamasında hidrojeni stabilize edecek türde kimyayı sağlayabiliyorduyorsa, çarpışma kaynaklı buharlaşmalar hidrojen zengini bir atmosfer oluşmasını sağlayabilirdi. İlk başlarda atmosferin büyük çoğunluğu buhardı ve henüz okyanuslar yoğuşmamıştı. Okyanusların oluşmasının ardından ortaya çıkan çarpışma kaynaklı buharlaşmanın atmosferleri kısa ömürlü olmalıydı. Hadeyan atmosferinin bileşimine dair belirsizlikler yüzünden, astrobiyologlar Miller ve Urey’in öne sürdüğünden başka organik karbon kaynakları öne sürdüler.

Alternatif açıklamalardan biri organik karbonun uzaydan gelmiş olmasıdır. Amino asit, alkol ve diğer organik bileşikleri içeren karbon zengini bazı meteoritler prebiyotik kimya için gerekli malzemeleri yeryüzüne saçmış olabilirler. Örneğin 1969'da Murchison'a (Avustralya) düşen Murchison meteoriti 14.000'den fazla çeşit molekül içerir. Ayrıca, 0,02-0,4 mm boyutlarındaki mikrometeoritler de Dünya yüzeyine her yıl yaklaşık 30 milyon kg organik karbon getirirler. Küçük parçacıkların hepsi atmosferde yanmadığı için organik karbon Dünya yüzeyine sağlam bir şekilde ulaşabilir. Dahası, kuyrukluysıldızların iç kısımları da organik materyal açısından zengindir ve kuyrukluysıldızın Dünya'yla çarpışmasından sağlam çıkan organik materyaller olduysa bunlar da yaşamın başlangıcında metoroitlere benzer bir rol oynamış olabilir.

Bir başka organik karbon kaynağı da derin denizlerdeki hidrotermal bacalardır. Hidrotermal baca, sıcak suyun deniz tabanından dışarıya çıktığı yerdir. Yeryüzünün tektonik tabakalarının ayrıldığı ve yer kabuğundan yükselen magmanın bu boşluğu doldurduğu yerlerde oluşan okyanus ortası sırtlarında yeni deniz tabanları meydana gelir. Deniz suyu sırtların yakınlarındaki çatlaklardan içeriye sızar, sıcak magma tarafından ısıtılarak tekrar yükselir; bu esnada su ile kayalar arasında gerçekleşen kimyasal tepkimelerle oluşmuş hidrojen, hidrojen sülfür ve çözünmüş demir gibi maddeleri de yanında taşır. Sıcak asidik su soğuk (2°C) okyanus suyuyla temas edince, çöken partiküllerden oluşan bir duman bulutu ortaya çıkar. Bu çöken parçacıklar bir demir sülfür (FeS_2 : Fe demir ve S sülfür) minerali olan koyu renkli pirit minerali içerir. Bu hidrotermal bacalara bu yüzden "kara duman" denir. Bir hipotez yaşamın bunlar gibi pirit minerallerinin yüzeyinde ortaya çıktığını öne sürer. Ancak kara dumanlar çok sıcaktır (350°C civarı), bu yüzden de yaşamın derin denizlerde ortaya çıktığını düşünen araştırmacıların çoğu daha soğuk (90°C civarı), asidik değil bazik olan ve okyanus ortası sırtlarından uzakta bulunan bacalara yoğunlaşmışlardır.

Alkali bacaların altında, su ile kayaların tepkimeye girmesiyle salınan hidrojen karbondioksitle birleşip metan ve daha büyük organik moleküller oluşturabilir. Hadëyan'da, bacalarda oluşan mineral yapılarındaki küçük delikler, prensipte, basit moleküller içermiş ve bunların birikerek tepkimeye girmelerini ve daha karmaşık prebiyotik moleküller oluşturmalarını sağlamış olabilir.

Ayrıca alkali bacalarda, püsküren sıvı deniz suyundan daha bazik olduğu için, hücrelerdekine benzer biçimde doğal bir pH gradyanı ya da farkı görülür. Eğer yaşam böyle bir çevrede ortaya çıkmışsa, enerji üretiminin neden pH gradyanlarına sıkı sıkıya bağlı olduğu açıklanabilir.

Yaşam, hücre zarlarında bulunan mikroskobik elektrik motorlarını ve zar boyunca görülen pH farklılıkları sayesinde oluşan elektrik akımlarını kullanarak enerji üretir. Bu muhteşem moleküller makineleri anlatmaya kelimeler yetmez, o yüzden okurlara internette “ATP sentaz animasyonu” araması yapmalarını öneririm. Temel olarak, hücre zarının iki yanında farklı pH değerleri oluşturmak için metabolik enerji kullanılır ve genellikle hücrenin dışı içinden daha asidik hale gelir. Bu kademeliliğe *proton gradyanı* denir çünkü pH bir solüsyonda bulunan pozitif yüklü hidrojen iyonlarının (protonların) konsantrasyon ölçümünün tersidir; konsantrasyon arttıkça pH azalır, asidite artar. Proton gradyanı esasen bir pile benzer. Deşarj olduğunda, elektrik akımı hücre zarındaki moleküller türbinden geçerek enerji depolayan moleküller oluşturur. Adenozin trifosfat veya “ATP” adı verilen bu moleküller tüm hücrelerde enerji taşıma görevini üstlenir. Örneğin insanda 250 g ATP bulunur ama bir insan üretilen ATP'nin kullanılıp yeniden üretilmesi sayesinde, bir günde vücut ağırlığına denk ATP kullanır.

Bahsettiğimiz ATP üretim sürecine *kemiozmoz* adı verilir; bu terim, suyun bir zardan geçişi anlamına gelen “ozmoz” sözcüğünü içerir çünkü proton hareketi de buna paraleldir. Kimyasal tepkimelerden enerji elde etme fikrinin yanında kemiozmoz o kadar

garıptır ki, 1961'de biyokimyacı Peter Mitchell tarafından öne sürüldüğünde çoğu biyokimyacı ona düşmanca yaklaşmıştı. Ama nihayetinde, 1978'de aldığı Nobel Ödülü'yle Mitchell'ın hakkı teslim edildi. Kemiozmozun yeryüzü yaşamının her türünde görülmesi ve büyük olasılıkla yaşamın kökeniyle ilişkili olması dünyadışı yaşam için iyon gradyanının temel önemde olabileceğini düşündürüyor.

Hayatın kökenindeki organik karbon kaynağı –atmosfer, uzay veya hidrotermal bacalar– konusunda net bir sonuca varabilmiş değiliz. Fakat böyle bir kaynağın mevcut olduğu durumlarda, kimyasal tepkimelerin gerçekleşmesi için organik bileşiklerin konsantrasyonu artmış olmalı, bu da mineral yüzeyler üzerinde –kuruma veya soğukluk kaynaklı– film oluşumu ile mümkün olabilir. Ardından basit organik moleküller bir araya gelip daha karmaşık moleküller oluşturmuş olabilir. Ama kimyasal sistemlerin “canlı” kabul edilmeleri için birkaç özelliğe daha sahip olmaları gerekir. En temel özellikler metabolizma, yarı geçirgen bir zarla çevrili olma ve bir genom vasıtasıyla kalıtımı sağlayan üremedir.

Son özelliği ele alırsak, yaşamın kökenine kıyasla laboratuvar deneyleri için daha kolay takip edilebilen bir konu yaşamın ilk dönemlerindeki varsayımsal bir evresi olan *RNA Dünyası*'dır. RNA'nın genetik malzeme olarak DNA'yı öncelediği bir evredir bu. Modern hücrelerde DNA'nın (deoksiribonükleik asit) sunduğu talimat listesi belirli proteinlerin üretilmesi için gerekli bilgiyi taşıyan RNA (ribonükleik asit) molekülleri üzerine kopya edilir. DNA RNA'ya benzese de ondan daha karmaşıktır, bu yüzden RNA'nın daha önce evrimleşmiş olması akla yatkındır. Dahası, 1980'lerde ribozim adı verilen bazı RNA moleküllerinin katalizör görevi yapabildiği keşfedildi. Demek ki RNA'nın bir zamanlar kendini kopyalama ve daha küçük moleküllerden oluşma sürecinde katalizör işlevi görmüş olması makul bir ihtimal. Bir sonraki evredeyse, RNA protein yapmaya başlamış ve bu proteinlerin bazıları RNA'dan daha iyi katalizörler olmuş olmalı. En sonundaysa, RNA'

nın yerini daha istikrarlı ve daha büyük bir molekül olan DNA almış olmalı çünkü bu özelliklerin ikisi de üremede daha çok fayda sağlar.

Yaşamın ortaya çıkmasında rol oynayan bir diğer önemli etken de bir genomun hücre zarıyla çevrenemesiydi. Bu durumun iki faydası vardı: biyokimyasalları yoğunlaştırarak tepkime hızlarını artırmak ve kendini kopyalayan moleküllere evrimsel bir avantaj sağlamak. Örneğin yararlı bir protein üreten bir RNA genomu bu proteini hücre içinde tutarak kendine saklayıp, bu şekilde kendi “soyundan gelenleri” kayırabilirdi.

“Önhücre” denilen yapılar laboratuvarıda üretildi. Yağlar suyla karıştırıldığında kendiliğinden küresel yapılar oluşur, hepimiz bu duruma mutfaklarımızdan aşınayızdır. Bu yağlı zarların modern hücreleri çevreleyen zarların öncüsü olmuş ve prebiyotik kimya için bir yüzey teşkil etmiş olması akla yatkın.

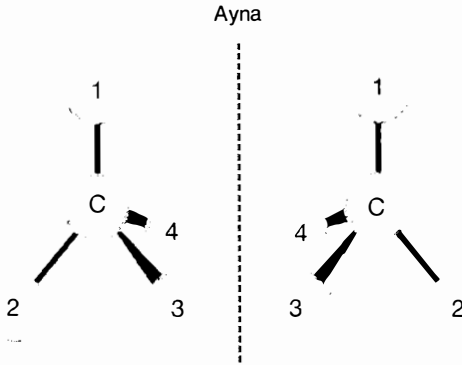
Daha sonraki olaylar şöyle gerçekleşmiş olabilir: RNA önhücrelere girdi, RNA genomu olan hücreler evrimleşti, ardından DNA genomu içeren modern hücreler onların yerini aldı. Bir noktada, belki de RNA Dünyası’ndan sonra, metabolizma da evrimleşti. Fakat metabolizmanın mı genetik kopyalamanın mı önce geldiğine yönelik tartışma hâlâ sürüyor. Yaşamın kökeninin gerçek konumu, koşulları ve evrimsel basamakları kesinleşmiş değil ve önemli gelişmelere gebe bir araştırma alanı olmayı sürdürüyor.

Kiralite (veya Tek Elle Alkışlama Sanatı)

Yaşamın kökenini betimlemeyi tamamlayabilmek için biyokimyanın konuyla ilgili bir başka yönünden de bahsetmek gerekiyor: Birbirinin ayna imgesi olan iki kısımdan oluşan biyomoleküller söz konusu olduğunda, Dünya üzerindeki yaşam bu yapılardan yalnızca birini kullanır, ikisini birden değil. Ayna görüntüsü simetrisine sahip olma özelliğine *kiralite* denir. Yunancada “el” anlamına gelen *cheir* sözcüğünden türemiş bir terimdir bu, zira el-

lerimiz birbirinin ayna imgesidir ve aynı yöne bakarken üst üste getirildiklerinde bire bir çakışmazlar. Eğer sol taraftaki bir yapının sağ taraftaki bir yapıdan gerçekten farklı olduğuna ikna olmadıysanız, ayakkabılarınızı gün boyunca ters ayağınıza giymeyi deneyin!

Bir biyomoleküldeki merkezi bir karbon atomu dört farklı atom grubuyla çevrelenirse kiralite ortaya çıkar. Bu gruplar kendilerini doğal biçimde tetrahedron yani dört üçgen yüze sahip bir piramit şeklinde düzenlerler. Eğer tetrahedronun tepesindeki gruplara “1” numarasını verirsek, üç tetrahedral ayağı saat yönünde veya saat yönünün tersinde şekildeki gibi numaralandırabiliriz:



Resimdeki iki molekül “kiraldir” çünkü üst üste çakıştırılmazlar. Bu moleküllere *enantiyomer* adı verilir (Yunanca “karşıt biçim” anlamına gelen *enantios morfe* tanımlamasından türemiş bir terim). Özel bir enantiyomeri, alanin amino asidini ele alalım. “1” bir hidrojen atomu, “2” bir karboksil grubu (COOH), “3” bir amin grubu (NH₂) ve “4” bir metil grubudur (CH₃). Genel kullanıma göre, 2’den 4’e saat yönünde gidiliyorsa alanin sağ elli veya D-biçimli (Yunancada *dextro* sağ anlamına gelir) olabilir. Saat yönünün tersindeki düzendeysse alanin L biçimindedir (Yunancada *lae-*

vo: sol). Şaşırtıcı bir şekilde, yeryüzündeki canlılar proteinlerde neredeyse yalnızca L-amino asitlerini; DNA, hücre duvarı ve sentezdeyse D-şekerlerini kullanır. Fakat kiral bir madde laboratuvarıda üretildiğinde, sol ve sağ eli biçimler genelde eşit miktarda üretilir, bunlara da *rasemik* karışım adı verilir.

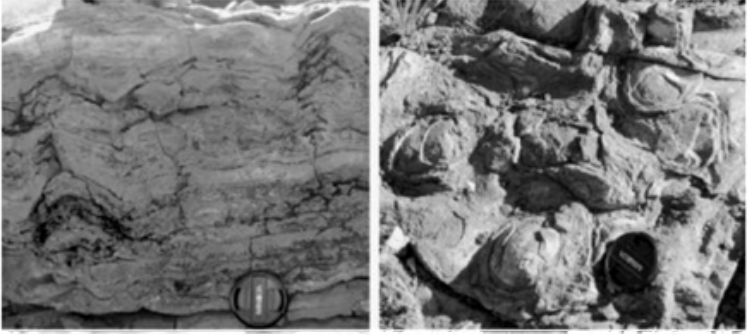
Kimyasal formülleri tamamen aynı olan kiral moleküller çok farklı etkilere sahip olabilirler. Bunun bir örneği, kötü bir şöhreti olan talidomid adındaki ilaçtır. Sağ eli biçimi hamile kadınlarda sabah bulantısını tedavi ederken, sol eli biçimi ağır doğum kusurlarına yol açabilir. Daha hoş bir örnek ise aroma verici limonendridir: D biçimi limon tadındayken, L biçimi portakal tadındadır.

Tüm canlılar tarafından paylaşılan ortak kiralitenin veya *homokiralitenin* nedeni nedir? Bu konuda iki genel hipotez var. İlki, yaşamı başlatan organik moleküllerde biraz daha fazla bulunan bir enantiyomerin zamanla giderek çoğalmış olmasıdır. Bu fazlalığı doğurabilecek fiziksel süreçlerden biri, yıldızlardan gelen polarize ışığın, dünyada yaşamı başlatacak organik moleküllerin uzayda sentezlenmesi sırasında kiral eğilime neden olmuş olmasıdır; ya da radyoaktif bozunmadan kaynaklanan polarize radyasyon enantiyomerik fazlalığa yol açmış olabilir. Buna benzer radyasyon kaynaklı fikirlerin sorunu, fazlalığın genelde küçük, yüzde 1'den az olmasıdır. İkinci hipotez prebiyotik kimyanın yalnızca enantiyomerlerin birini tercih ederek oluşmuş olmasıdır. Örneğin mineral yüzey üzerindeki emilim kiral seçiciliğe sahip olabilir. Kimyasal kinetik genellikle, saf bir maddede bir karışıma kıyasla daha verimlidir, bu durum da daha fazla çoğalmaya neden olabilir. Genomun çoğaltılması gibi bir biyolojik süreç homokiralite gerektirebilir. RNA Dünyası modelinde kopyalama için homokiralite gereklidir çünkü yalnızca aynı kiraliteye sahip RNA zincirleri bir RNA kalıp zinciriyle dizilebilir.

Erken Yaşamın İşaretleri

Yaşamın kökeni hâlâ bilinmiyor olsa da, yeryüzündeki en eski tortul kayaçlarda olası yaşam işaretleri bulabiliriz. Belki de bu (volkanik akıntılara karışmış) kayaçların Geç Dönem Ağır Bombardmanın sonuna ait, yaklaşık 3,8 Ga yaşımda olmaları tesadüf değildir. Bu kayaçlar Güneybatı Grönland'ın iç kısımlarındaki Isua'da bulunurlar. Mordor'u andıran karanlık, meşum bir manzara oluşturan bu buzlu kayaçlar, bize erken Dünya hakkında pek çok kayda değer veri sağlar. Orada suyun etkisiyle yuvarlanmış çakıltaşları bulmak mümkündür. Ayrıca, denizin tabanındaki bazı tortularda grafit formunda karbon taneleri de bulunur. İzotop analizi bu karbonun daha önce okyanusta yaşayan mikroplara ait olduğunu gösteriyor. Karbonun iki kararlı izotopu bulunur, karbon-12 ve karbon-13. Yaşam dokularında karbon-13'ten biraz daha fazla karbon-12 bulundurmaya eğilimlidir çünkü daha hafif olan karbon-12 atomları biyokimyasal olarak daha hızlı tepkimeye girer. Isua'daki grafit, karbon-12 bakımından yaklaşık yüzde iki daha zengindir, bu da deniz mikroplarındaki oranla benzerlik taşır. Buradan çıkarılacak sonuç, ölmüş deniz mikroplarının tortuya karışmış ve burada karbonun sıkışarak grafitte dönüşmüş olduğudur.

Erken dönemlerdeki yaşamın daha iyi korunmuş bir kanıtı 3,5 Ga yaşındadır ve Kuzeybatı Avustralya'da bulunmuştur. Meslektaşım Roger Buick, 1980'lerde Kuzeybatı Avustralya'daki North Pole'un yakınlarında bu yaştaki fosil stromatolitler buldu. Şakacı bir Avustralyalı bu yeri "North Pole" (Kuzey Kutbu) olarak adlandırmış çünkü burası dünyadaki en sıcak, en güneşli yerlerden biri. Stromatolitler güneş ışığının ulaşabileceği sığıltaki sularda yaşayan fotosentez yapan mikrobiyal toplulukların oluşturduğu katmanlı tortul yapılardır. Stromatolitler genellikle kıvrımlı laminasyonlar içeren kubbeli bir biçime sahiptir. Bu kubbeler, *mikrobiyal mat* adı verilen mikrop katmanları güneş ışığına doğru büyürken,



Şekil 2. Sol: Avustralya North Pole'daki Dresser Oluşumu'nda bulunan dünyanın en eski fosil stromatolitlerinin kesit görüntüsü. Sağ: Stromatolit yatağının kuşba-kışı görünümü, stromatolitlerin üst kısımları görülüyor. Resimdeki lens kapağının çapı 5 cm'dir.

altta kalan tortuların birikmesiyle oluşur. Modern stromatolitlerde canlı kısım –mat– birikmiş mineral katmanlarının üzerinde oluşan, tofu benzeri bir dokuya sahip, bir santimetre kalınlığında bir kaplamadır. Eğer zamanda geriye gidip Arkeyan dünyaya yolculuk edebilseydik, kıyı kesimlerinin tüm dünyada tamamıyla stromatolitlerle kaplandığını görürdük. Günümüzdeyse stromatolitler nadir görülür çünkü (Arkeyan'da var olmayan) bazı balıklar ve salyangozlar onları oluşturan mikrobiyal matları tüketir. Dolayısıyla modern stromatolitler yalnızca bu obur hayvanlar için fazla tuzlu lağün ve göllerde bulunur.

Bazı şüpheciler North Pole yapılarının yaşam olmadan oluşabileceğini yani gerçekten stromatolit olmadıklarını düşünseler de, çoğu astrobiyolog bu yapıların organik kökenlerini kabul eder çünkü görmeyi beklediğimiz pek çok biyolojik özelliğe sahiptirler. Fosil stromatolitler yalnızca fiziksel süreçlerle oluşmuş kıvrımlar olarak açıklanması zor aşırı düzensiz kıvrımlı katmanlara sahiptir. Ayrıca katmanlaşma konveks kıvrımların üst kısmında kalınlaşır, bu da daha fazla güneş ışığı olan yerde fotosentetik mikroplar çoğaldığı zaman görülen bir durumdur. Bu kıvrımlar

arasında bulunan parçacıkların deniz dalgaları tarafından parçalanmış mikrobiyal mat parçaları olarak yorumlanması akla yatkındır. Bu parçalar organik karbon bulunduran ince, kıvrımlı katmanlar içerir. Tüm bu gözlemler beraber ele alındığında, gerçekten de North Pole stromatolitlerinin çıplak gözle görülebilen en eski fosil yapılar oldukları öne sürülebilir.

Geçmiş yaşamın kanıtlarını bulmak için tekhücreli organizmaların cansız bedenlerini de arayabiliriz, çünkü Dünya tarihinin bu çok eski dönemlerinde yalnızca mikroplar hayattaydı. Yalnızca mikroskopla görülebilen bu *mikrofosiller*, çört (silika zengini ince taneli kayaçlar, çakmaktaşı bunun tanıdık bir örneğidir) ve şeyl (bir zamanlar çamur olan ince parçacıklı tortul kayaçlar) gibi oluşumlarda bulunur.

Mikrofosilleri inceleyen jeologlar uygun ortamlardan aldıkları kaya örneklerini laboratuvara götürüp dilimlemler ve mikroskop altında bir şeyler görünmesini umut ederler. Hedefi tutturmanın her zaman mümkün olmadığı bir iştir bu. Yaşamı yaşam olmayandan ayırma sorunu da tekrar o çirkin yüzünü gösterir, çünkü mineral taneleri bazen fosil hücelere benzer. Dolayısıyla hücre bölünmesinin, koloni davranışının veya hücreler bir sıra halinde dizildiğinde görülen (ipliksi) filament yapılarının izlerini taşıyan mikrofosiller daha ikna edicidir. Mikrofosillerin organik karbon içerip içermediğine de bakılabilir.

Güney Afrika'da görülen 2,55 Ga yaşımda mikrofosiller, tartışma götürmeyen en eski mikrofosillerdir. Bu mikrofosiller ikna edicidir çünkü organik karbon içeren filament matlarının içinde bulunmuşlardır ve hücre bölünmesi sırasında hareketsiz kalmış mikrobiyal formlar içerirler. Güney Afrika'da 3,2-3,5 Ga yaşımda potansiyel mikrofosiller de vardır; bunlar küremsi bir biçimdedir, organik karbon içerirler ve hücre bölünmesi geçirmiş gibi görünürler, ama diğer biyolojik özelliklere sahip değildirler. Kuzeybatı Avustralya'daki Strellet Havuz Oluşumu'ndaki kumtaşında bulunan 3,4 Ga yaşımdaki benzer mikrofosil kolonilerinin içerdığı

organik karbonlar da tipik olarak canlılarda görülen türden izotoplardır.

Dünyanın en çok tartışma yaratan mikrofosilleri, Kuzeybatı Avustralya'daki Apex çört kaya oluşumunda görülen 3,5 Ga yaşındaki mikrofosillerdir. Bunlar Los Angeles'taki California Üniversitesi'nden Bill Schopf tarafından 1990'larda "dünyanın en eski mikrofosilleri" olarak adlandırıldı. Yapılar hücre benzeri kısımlara ayrılmış gibi görünen siyah ve koyu kahve damarlardan oluşuyor. Schopf bu yapılara soyu tükenmiş siyanobakteriler (fotosentetik bakteriler) olduklarına işaret eden Latince isimler vermişti. 2002 yılında Oxford Üniversitesi'nden Martin Brasier örnekleri yeniden inceledi. Brasier bu örneklerin üç boyutlu incelemelerde mikrobiyal filamentlere benzemediğini gösterince şiddetli bir tartışma çıktı. Brassier ayrıca çörtün tortul değil hidrotermal bacalarda üretilen türde olduğunu ve güneş ışığına ihtiyaç duyan siyanobakterilerin burada bulunmasının pek olası olmadığını da belirtti. O zamandan beri yapılan araştırmalar filamentlerin aslında kısmen, bir demir oksit olan hematitle dolu olduğuna ve koyu rengin bundan kaynaklandığına işaret ediyor. Ancak, organik karbonun filamentlerin dışındaki çörtün içine yayılmış olması tartışmanın sürmesine yol açıyor.

Şimdiye kadar izotoplardan, mikrofosillerden ve stromatolitlerden bahsettik. Erken yaşamın bir diğer işareti de *biyobelirteçlerdir*, yani biyolojik moleküllerin tespit edilebilir türevleri. Fosil iskeletlerin bize bir *Tyrannosaurus rex*'i veya *Triceratops*'u ayırt etme imkânı verdiği fikrine hepimiz aşinayız. Mikroskobik ölçekteyse, mikroplar karbon atomu halka veya zincirleri içeren organik molekül kalıntılarını arkalarında bırakırlar. Bu "moleküler omurgalar" yalnızca belli türde mikroplarda bulunan belli moleküllerden gelir. Öyleyse biyobelirteçler yalnızca geçmiş yaşamın varlığını doğrulamakla kalmaz, aynı zamanda spesifik yaşam formlarına da işaret eder.

Ne yazık ki, tıpkı bazı mikrofosillerde olduğu gibi çok eski bi-

yobelirteçler de tartışma batağına gömülmüştür. Bildirilen en eski biyobelirteçler 2,8 Ga yaşındadır ve oksijen üreten siyanobakterilerin varlığına işaret eden moleküllere benzerler. Fakat incelenen kayalara daha yakın tarihli organik materyal de bulaşmış olabilir. Daha kesin biyobelirteçler 2,5 Ga yaşındaki kayaların içindeki kirlenmemiş gibi görünen küçük sıvı kapanımlarda (*fluid inclusions*) bulundu.

Bazı kanıtlar kısıtlı olsa da genel kayıtlar Dünya üzerinde yaşamın 3,5 Ga önce, yani oluşumundan sonraki 1 milyar yıl içinde ve ağır bombardımandan hemen sonra ortaya çıktığını gösteriyor. Bu da yaşamın uygun gezegenlerde, jeolojik zaman ölçeğine göre oldukça kısa sürede ortaya çıkabildiğine işaret ediyor. Demek ki jeolojik olarak kısa bir dönem boyunca yaşama elverişli koşullar sunduğunu düşündüğümüz Mars'ta da (6. Bölüm) yaşamın evrimleşmiş olması ihtimal dışı değil.

Çamurdan Yüceye

Yeryüzü Yaşama Uygun Bir Çevreyi Korumayı Nasıl Başardı?

Yaşam nasıl başlamış olursa olsun, bir kez ortaya çıktıktan sonra 3,5 milyar yıl boyunca devam etmiş ve mikrobiyal çamurdan insan uygarlığının karmaşıklığına evrilmiştir. Bu süre zarfında Dünya’da okyanuslar bulunuyordu ve güneş ışığı miktarı yüzde 25 oranında artmış olsa da büyük çoğunlukla ılıman bir iklim hüküm sürüyordu. Güneş’in kademeli olarak parlaklaşması, anakoldaki parlama biçiminin bir sonucudur. Güneş’in çekirdeğinde dört hidrojen atomu birleşip bir helyum çekirdeğine dönüşünce parçacık sayısı azalmış olur, bu yüzden de çekirdeğin üstündeki materyal boşlukları doldurmak için iç kısımlara baskı yapar. Sıkışan çekirdek ısınır, füzyon tepkimelerinin gerçekleşme hızının artmasına neden olur, bu yüzden Güneş’in parlaklığı milyar yıl başına yüzde 7 ila 9 oranında artar. Bu teori, farklı yaşlardaki Güneş benzeri yıldızların gözlemlenmesiyle doğrulandı.

Eğer Dünya 2 Ga veya daha öncesinde günümüz atmosferine sahip olsaydı, daha soluk Güneş altındaki gezegenimizin tamamen donması gerekirdi, ama jeolojik kanıtlar böyle olmadığına işaret ediyor. Bu soruna *soluk genç Güneş paradoksu* adı verilir. Sıvı suyun en azından 3,8 Ga önce yeryüzünde bulunduğuna dair kanıtlar

var, bunlardan biri örneğin su tarafından kıtalardan okyanuslara taşınan materyallerin oluşturduğu tortul kayaçların varlığı.

Soluk genç Güneş paradoksunu çözmenin üç yolu var. En akla yatkın açıklama, geçmişte sera etkisinin daha fazla olduğu yönünde. Bir diğer açıklama, Dünya'nın çok eskiden günümüze kıyasla daha karanlık olduğu ve güneş ışığını daha çok emdiği tezine dayalı, ancak bunu destekleyen pek fazla kanıt yok. Üçüncü bir fikirse, genç Güneş'in çok miktarda materyali hızlı biçimde uzaya saldıgını (güneş rüzgârı), dolayısıyla Güneş çekirdeğinin zaman içinde üstündeki ağırlık yüzünden yukarıda varsaydığımız kadar sıkışıp ısınmadığını öne sürüyor. Eğer kütle kaybı tam ayarında idiyse, Güneş'in ilk başta da günümüzdeki kadar parlak olması mümkündür. Ama Güneş benzeri genç yıldızlarda gerçekleştirilen gözlemler bugüne dek üçüncü varsayımı desteklemedi.

İlk fikri değerlendirirken, atmosfer bileşiminin atmosferin Dünya'yı ne kadar ısıtacağını belirlediğini göz önünde bulundurmamız gerekiyor. Atmosfer olmasaydı (ve Dünya'dan yansıyan güneş ışığı miktarı aynı kalsaydı) Dünya'nın yüzeyi dondurucu bir sıcaklıkta, -18°C civarında olurdu. Bugün ortalama yüzey sıcaklığı ise $+15^{\circ}\text{C}$ 'dir. Aradaki 33°C 'lik fark ($= 18 + 15$) atmosfer kaynaklı ısınmanın sonucu, Dünya'nın *sera etkisinin* büyüklüğüdür.

Sera etkisi nasıl oluşur? Gezegenin yüzeyi görünür Güneş ışığıyla ısınır ve kızılötesi ışınlar yayar, tıpkı sıcak vücudunuzun da yaptığı gibi. Atmosfer aşağıdaki yüzeyden gelen kızılötesi radyasyonun geçişine izin vermeme eğilimindedir, bu yüzden de kızılötesi enerjiyi emerek ısınır. Atmosfer sıcak olduğu için o da kızılötesi ışınlar yayar. Bu atmosfer radyasyonunun bir kısmı tekrar gezegene ulaşır. Gezegenin yüzeyi atmosferinin bulunmadığı duruma kıyasla daha sıcak olur çünkü görünür ışığın yanı sıra ısınmış atmosferden de enerji alır.

3,5 Ga önce Güneş yüzde yirmi beş daha soluktu; Dünya'nın günümüzde 33°C 'lik sera etkisiyle sağlanan ortalama sıcaklığa sahip olabilmesi için o zamanlar 50°C 'lik sera etkisi gerekirdi.

Dünya'nın yüzeyinden yansıyan kızılötesi radyasyonu emen sera gazları daha yüksek seviyelerde olsaydı daha güçlü bir sera etkisi ortaya çıkardı. Günümüzde 33°C'lik sera etkisinin üçte ikisi su buharı kaynaklıyken, geri kalanı da karbondioksit (CO₂) kaynaklıdır. Fakat su buharı yağmur veya kar şeklinde yoğunlaştığı için, aslında arka plan sıcaklığına tepki verir. Bu arka plan sıcaklığıysa yoğunlaşmayan atmosferik CO₂ tarafından belirlenir. Bu şekilde, seviyesi düşük olsa da günümüzde sera etkisini CO₂ kontrol eder. Dünya'nın atmosferinde 1700 yılı civarında yaklaşık milyonda 280 birim CO₂ varken (yani bir milyon hava molekülünün 280'i CO₂'den oluşurken), bu oran 2010'da milyonda 390 birime yükseldi. Sanayileşmeden bu yana, ormansızlaşma ve petrol, kömür gibi fosil yakıtların kullanımı CO₂ açığa çıkarıyor. *Paleosollerde* (fosilleşmiş toprak) gerçekleştirilen kimyasal analizlerde, Geç Arkeyan devirde CO₂ üstsınırının sanayi öncesi dönemin 10 ila 100 katı seviyesinde olduğu sonucuna ulaşıldı. Ama bu seviyeler bile soluk genç Güneş'i dengelemeye yetmiyordu.

Aslında Arkeyan atmosferinde milyonda bir birimden az oksijen molekülü (O₂) bulunuyordu, bu da metan (CH₄) gazının önemli bir sera gazı olduğu anlamına gelir. Günümüzde atmosferik metan milyonda 1,8 birim gibi düşük bir seviyededir çünkü havadaki en yoğun ikinci gaz olan (%21) oksijenle tepkimeye girer. (Günümüz havasının çoğu yüzde 78'lik bir oranla azottur ama ne oksijen ne de azot sera gazıdır.) Arkeyan devirde oksijenin bulunmaması atmosferik metan seviyesinin milyonda binlerce birim seviyesine ulaşmasına olanak sağladı. Metan sınırsızca birikemezdi çünkü üst atmosferde morötesi ışınlarla parçalanabiliyordu. Metanın parçalanmasıyla ortaya çıkan maddeler daha sonra başka hidrokarbonlar oluşturabilir; hidrokarbonlar hidrojen ve karbondan oluşan kimyasallardır, örneğin etan gazı (C₂H₆) ve kurumlu partiküllerden oluşan sis bulutları gibi. Metan, etan ve karbondioksit karışımı—ve bu yoğunlaşmayan sera gazlarının belirlediği sıcaklık ile miktarı artan su buharı—solgun Güneş'i dengelemeye yetecek bir sera et-

kisi oluşturmuş olmalı. Burada tıpkı günümüzde olduğu gibi o zamanlarda da metanın mikrobiyal yaşamdan kaynaklandığı varsayımından yola çıkılıyor, ki akla yatkın bir varsayımdır bu, çünkü metan üretim metabolizması çok eskiye dayanır (bkz. 5. Bölüm).

Yaşam ortaya çıkmadan önce Dünya atmosferinin neye benzediğini sorabiliriz elbette. O durumda, sera etkisinin tıpkı günümüzde olduğu gibi CO₂ tarafından kontrol ediliyor olması muhtemeldir. Aslına bakılırsa, Dünya tarihinin büyük kısmı boyunca, yaklaşık bir milyon yıllık zaman ölçeklerinde iklimi düzenleyen jeolojik bir CO₂ döngüsü olmuştur. (Bu döngü günümüzde de devam ediyor olsa da insan kaynaklı küresel ısınmaya karşı koyabilecek kadar hızlı değildir.) Temelde, atmosferdeki CO₂ yağmur suyunda çözünüp kıtalar üzerindeki silikat kayalarıyla tepkimeye girer. Bu *kimyasal ayrışmayla* ortaya çıkan karbon nehirlerle okyanuslara taşınıp deniz tabanındaki kireçtaşı (kalsiyum karbonat, CaCO₃) gibi kayalara karışır. Eğer burada sadece karbonatların birikimi söz konusu olsaydı Dünya atmosferik CO₂'yi kaybedip donardı, fakat CO₂'yi atmosfere geri kazandıran bir mekanizma da vardır. Deniz tabanındaki karbonatlar, yavaşça hareket eden ve diğer levhaların altına giren okyanus levhaları üzerinde taşınır. Şili'nin altında doğuya doğru kayan Güney Pasifik'teki "Nazca" levhası bu durumun günümüzdeki bir örneğidir. Bu süreçte karbonatlar şıkışıp ısınır ve CO₂'ye ayrışır. Volkanizm (kayaların erimesi) ve başkalaşım (kayaların ısınıp basınç altına girmesi ancak erimesi) sonucunda CO₂ salımı gerçekleşir. CO₂ kaybı ve telafisinden oluşan döngünün tamamı *karbonat-silikat döngüsü* olarak adlandırılır ve tıpkı bir termostat gibi davranır. Eğer hava ısınır, daha fazla yağmur ve daha hızlı yağış CO₂ tüketir ve Dünya'yı serinletir. Eğer yeryüzü soğursa CO₂'nin kuru havadan ayrılması yavaşlar, jeolojik salımlardan gelen CO₂ birikim sera etkisini artırır.

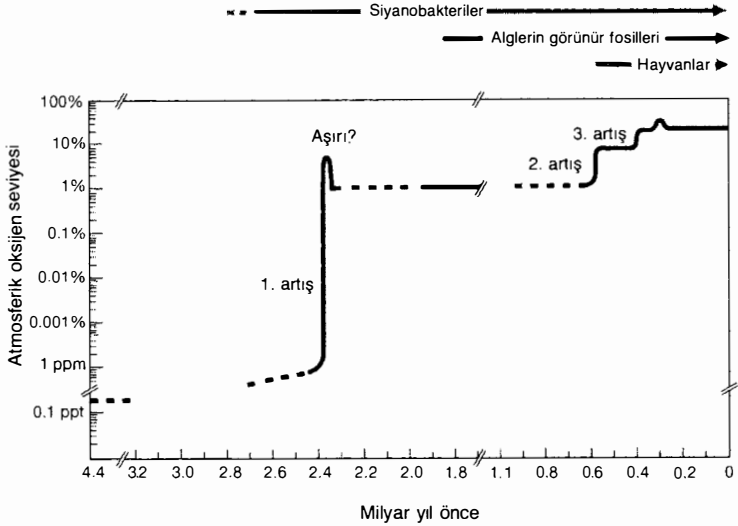
Yaşam ortaya çıkmadan önce karbonat-silikat döngüsü iklimi kontrol etmiş olmalı. Sonrasındaysa, atmosferik oksijen yoğunluğunun artması sonucunda metan sera gazı iki adımda düştüğünde,

karbonat-silikat döngüsü, giderek daha önemli hale gelen bir termostat rolü oynamış olmalı. Atmosferik oksijen biri yaklaşık 2,4 Ga diğeri ise 750-580 Ma önce (Ma “milyon yıl” anlamına gelen “mega annum”un kısaltmasıdır) olmak üzere iki kere artış göstermişti.

Öte yandan bu döngü Hadeyan’da ve muhtemelen Arkeyan devirde farklı bir şekilde işlemiş olabilir çünkü *levha hareketleri* veya *levha tektoniği* –jeolojik levhaların alt kısımdaki mantoda bulunan konveksiyon hücreleri üzerinde gerçekleşen büyük ölçekli hareketleri– büyük ihtimalle farklı bir tarzdaydı. Mantodaki (çekirdekle kabuk arasındaki) radyoaktif elementler bozunduğunda ısı açığa çıkar ve erken Dünya’da daha fazla element bozunuyordu. Dolayısıyla bir yandan daha sıcak ve daha gevşek Hadeyan mantosu okyanus kabuğunun daha çabuk batmasını sağlamış olmalı. Öte yandan, mantonun daha sıcak olması daha fazla erimeye yol açmış ve bu şekilde ortaya çıkan daha kalın ve daha ılık okyanus kabuğunda daha az batma görülmüş olmalı. Genel olarak, zirkonlardan çıkarsanan granit varlığı (3. Bölüm) kabuğun bir şekilde gömülmüş olması gerektiğine işaret ediyor, çünkü granitin oluşması için çökmüş kabuğun erimesi gerekir. Dünya’nın erken döneminde nasıl bir tektonik hareketlilik bulunduğu meselesi hâlâ çözülebilmüş değil.

Büyük Oksidasyon Olayı: Karmaşık Yaşama Doğru Bir Adım

Dünya’nın atmosferik bileşimindeki en köklü değişimler oksijen artışlarıdır; bu artışlar yaşamın evriminde sera gazlarındaki varyasyonlar kadar önem taşır. Dünya tarihinin büyük kısmında oksijen seviyeleri o kadar düşüktü ki oksijen soluyan hayvanların var olması imkânsızdı. *Büyük Oksidasyon Olayı* atmosferin ilk defa oksijenli hale geldiği 2,4-2,3 Ga önce gerçekleşti. Fakat ok-



Şekil 3. Atmosferdeki oksijenin jeolojik kanıtlarla belirlenen tarihi (1 ppm = milyonda bir birim; 1 ppt = trilyonda bir birim)

sijen seviyeleri hava hacminin yalnızca yüzde 0,2 ila 2'si seviyesine ulaşabilmişti, yani bugünün yüzde 21'lik oranına çok uzaktı. Büyük hayvanlar ancak, yaklaşık 580 Ma önce oksijen ikinci kez artıp yüzde 3 seviyelerinin üstüne çıkınca ortaya çıkmaya başladı (Şekil 3).

Atmosferdeki oksijenin (O_2) neredeyse tamamı biyolojiktir. Morötesi güneş ışığı üst atmosferde su buharı moleküllerini parçalayıp hidrojeni serbest bıraktığı zaman çok az miktarda oksijen üretilir. Hidrojen uzaya kaçıp tekrar su oluşmasını engellediği için geriye saf oksijen kalır. Ama abiyotik oksijen üretimi azdır çünkü üst atmosfer kurudur. Esas oksijen kaynağı yeşil bitkiler, algler ve siyanobakterilerin güneş ışığını kullanıp suyu oksijen ve hidrojene ayrıştırmasıyla gerçekleşen *oksijenli fotosentez*dir. Bu organizmalar hidrojeni karbondioksitle birleştirip organik madde oluşturur ve atık olarak O_2 üretirler.

Oksijensiz fotosentez denilen bir başka ve daha ilkel tipteki mikrobiyal fotosentez sırasında ise ne su parçalanır ne de oksijen salınır. Bu durumda, biyokütle yapımı için güneş ışığı ve hidrojen, hidrojen sülfür veya yanardağların etrafındaki hidrotermal bölgelerdeki çözünmüş demir kullanılır. Günümüzde mikrobiyal çamur sıcak su kaynaklarında bu şekilde çoğalır.

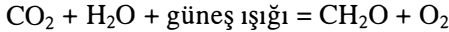
Bitkiler ve algler evrimleşmeden önce, oksijen üreten ilk organizmalar modern siyanobakterilere benziyordu. Siyanobakteriler günümüz okyanus ve göllerinde bolca bulunan mavimsi-yeşil bakterilerdir. DNA çalışmaları, siyanobakteri benzeri bir mikrobun bitkiler, algler ve modern siyanobakterilerin atası olduğunu gösteriyor. Dolayısıyla, siyanobakteriler evrimleştiğinde atmosferin oksijenlendiğini varsayabiliriz. Fakat kanıtlar bize oksijen atmosferi doldurmadan çok önce siyanobakterilerin oksijen ürettiğini gösteriyor. Oksijen tüketen kimyasallar olan *redükthanların* ilk başlarda oksijeni hızlıca tüketmiş olması akla yatkın bir açıklama. Redükthanlar yanardağlardan, jeotermal alanlardan ve deniz yüzeyi bacalarından gelen hidrojen, karbonmonoksit ve metan gibi gazları içerir. *Bantlı demir oluşumları* adı verilen Arkeyan kökenli demir zengini tortul kayaçlardan edindiğimiz bilgiler, Arkeyan okyanuslarında –günümüz okyanuslarından farklı olarak– kayda değer miktarda çözünmüş demir bulunduğunu ve bunların da oksijenle tepkimeye girdiğini gösteriyor.

Stromatolitlerden ve oksijenle tepkimeye girip çözünen kimyasalların varlığından elde edilen kanıtlara göre, fotosentetik oksijenin ilk işaretleri 2,7-2,8 Ga önce görüldü. Kuzeybatı Avustralya'daki Tumbiana Oluşumu denilen kayalardaki stromatolitler bir zamanlar kadim gölleri çevreliyordu. Teorik olarak, mikroplar bu stromatolitleri oksijensiz fotosentezle oluşturmuş olabilir, ama bu metabolizma için gereken hidrotermal emisyonlara dair hiçbir kanıt yok. Daha ziyade, bu stromatolitler büyük ihtimalle oksijenli fotosentez yapan siyanobakteriler tarafından oluşturulmuş olmalı; siyanobakteri filamentlerinin güneş ışığına yönelmesiyle oluşan

öbekler ve tepeler de bu kanıyı destekliyor. Dahası, yalnızca oksitlendikleri zaman çözünen molibden ve sülfürün 2,8 Ga sonra deniz tabanında ulaştığı seviye ancak, mikropların karadaki bu elementleri stromatolitler gibi yerel oksijen kaynaklarını kullanarak oksitlemiş olması koşuluyla mümkündür.

Oksijenin Dünya'nın atmosferinde hemen birikmemiş olmasının bir diğer nedeni de oksijen üretiminin genellikle sıfır-toplamlı bir süreç olmasıdır. Bir oksijen molekülü üretildiğinde ona eşlik eden bir organik karbon da üretilir, aşağıdaki denklemde özetlendiği gibi:

karbondioksit + su + güneş ışığı = organik madde + oksijen



Bu süreç kolayca tersine çevrilebilir, yani organik madde oksijenle tepkimeye girip karbondioksit ve su oluşturabilir. Ayrıca Arkeyan atmosferinde oksijen bulunmaması, mikropların organik karbonu metan gazına kolayca dönüştürebildiği anlamına gelir, tpıkı günümüzde kokulu, oksijensiz göllerde ve deniz tabanı tortularında da olduğu gibi. Havada, metan oksijenle tepkimeye girip su buharı ve karbondioksit oluşturabilir. Her iki durumda da –doğrudan tersinme ve metanla dolaylı yoldan iptal– fotosentezin varlığına rağmen net oksijen üretimi yoktur.

Ne var ki, organik karbonun küçük bir kısmı (halihazırda yüzde 0,2 kadarı) tortularda gömülü ve oksijenden ayrıdır, bu da iki elementin bir araya gelmesini engeller. Gömülen her organik karbon serbest kalan bir O₂ molekülüne karşılık gelir. Tabii ki bu “serbest kalmış” oksijen organik karbon dışındaki pek çok maddeyle de tepkimeye girebilir, buna jeolojik gazlar ve demir gibi çözünmüş mineraller de dahildir. Yine de, atmosfere redüktan akışı organik karbonun gömülmesinden kaynaklanan net oksijen akışının altına düşünce bir taşma noktasına ulaşıldı ve Büyük Oksidasyon Olayı'na neden oldu. Daha sonra, yağmur suyunda çözün-

müş oksijen kıtalardaki minerallerle yoğun bir şekilde tepkimeye girdiği için, oksijen birikiminin daha fazla artması engellenmiş ve yüzde 0,2-2 aralığında oksijen seviyesine ulaşılmış olmalı.

Nitekim oksidasyon miktarındaki artış Büyük Oksidasyon için kanıt teşkil eder. Demir minerallerinin oksijenle tepkimeye girmesiyle pas renginde yüzeyler, namı diğer “kırmızı yataklar” ortaya çıktı. Günümüzde Amerika’nın güneybatısındakiler gibi kırmızımsı toprak yüzeyleri sık görülüyor. Atmosferdeki sülfür etkinliğinde de bir değişim gerçekleşti. Büyük Oksidasyon’dan önce, milyonda bir birimden daha az atmosferik oksijen varken, kırmızı ve sarı renkli elementel kükürt parçacıkları kelimenin tam anlamıyla gökten düşüyordu. Bu partiküller, kilometrelerce yüksekte gerçekleşen kimyasal tepkimelerde, yanardağlardan çıkan sülfür dioksit gazının morötesi ışık tarafından parçalanmasıyla oluşuyordu. Kayalara düşen sülfür partikülleri, atmosferde oluştuklarına işaret eden bir sülfür izotop bileşimi içeriyordu. Büyük Oksidasyon’un ardından, oksijen atmosferik kükürtle birleşerek, element partiküllerinin oluşmasını engelledi. Gökyüzü temizlendi ve izotopik imza tortul kayalardan kayboldu.

Büyük Oksidasyon ile beraber Dünya’nın stratosferik ozon tabakası oluştu. 20 ila 30 kilometre yükseklikteki bu yoğun ozon tabakası Dünya’yı zararlı morötesi ışıklardan koruyan bir kalkan oluşturur. Eğer ozon tabakası olmasaydı, bir dakikadan kısa bir sürede cildinizde ciddi bir güneş yanığı olurdu. Ozon üç oksijen atomundan oluşan bir moleküldür (O_3). Güneş ışığı bir oksijen molekülünü iki oksijen atomuna (O) böler, ardından da bu atomlar diğer O_2 molekülleriyle birleşerek ozonu (O_3) oluştururlar.

Büyük Oksidasyon’un nedeni hâlâ tartışılıyor, ama cevap ya daha fazla organik maddenin gömülmesi sonucunda oksijen üretiminin küresel olarak artması ya da oksijen tüketiminin azalması olmalı. İlk açıklamanın sorunu, organik maddenin deniz suyundan hafif karbon izotopunu çekmesi ancak eski kireçtaşlarında belirlenen deniz suyu karbonunun hafif karbon izotopu içeriğinde

istikrarlı bir azalma gözlenmemesidir. Bu da geriye yalnızca ikinci açıklamayı bırakıyor.

Peki oksijen tüketen kimyasalların yani redükthanların akışındaki azalmaya ne neden oldu? Olasılıklardan biri, nispeten büyük miktarlardaki metan ve hidrojen gibi hidrojen taşıyan gazların (oksijensiz bir atmosferde kaçınılmaz bir durumdur bu) üst atmosferden uzaya hızlı bir hidrojen kaçışına yol açmış olmasıdır. Hidrojen kaybı katı gezegeni oksitlemiş, oksitlenmiş kayalarda redükthanlar azalmış, böylece redükthanların daha fazla salınması kademeli olarak engellenmiş olmalı. Oksidasyon meydana gelir çünkü kaçan hidrojenin kaynağı genellikle sudur (H_2O). Hidrojen ortamdan uzaklaştığında, oksijeni ardında bırakır. Su buharının kendisi üst atmosfere ulaşırken zorluklar yaşar çünkü yoğunlaşıp bulut oluşturur, ama metan gibi hidrojen taşıyan gazlar yoğunlaşmayıp hidrojeni uzaya kaçıır.

Kaba bir analogiyle, Büyük Oksidasyon liselerde yapılan bazik solüsyonunun içine asit damlatarak derişim bulma deneylerine benzer. Genelde renksiz solüsyonun bir anda renk değıştirenerek kırmızıya dönüştüğü görülür. Atmosfer de çok eski zamanlarda benzer şekilde hidrojen zengini bir bileşimden oksijen zengini bir bileşime dönüşmüştür.

Hayvan Yaşamının Ortaya Çıkışıyla Sonlanan Sıkıcı Bir Milyar Yıl

Okyanus ve kara Büyük Oksidasyon değışimine ayak uydurdu ve yaklaşık 1,8 Ga önce atmosferik oksijen dengeye kavuştu. Oksijen seviyesi inanılmaz derecede uzun bir süre boyunca yüzde 0,2 ile 2 arasında kaldı. Karmaşık yaşama doğru evrim yavaştı, belki de bunun nedeni orta derecede oksijenli olan yüzey okyanusunun altında, çoğunlukla çözünmüş demir veya hidrojen sülfür bakımından zengin olan oksijensiz suların bulunmasıydı. Bu oksijensiz

koşullar karmaşık yaşam için hiç uygun değildir. Aslında 1,8 Ga öncesinden 0,8 Ga öncesine kadar süren aralıkta evrim o kadar yavaştı ki, bu evreye *sıkıcı milyar* denir. Bilimsel bir makaleye göre, “yeryüzü tarihinin hiçbir döneminde bu kadar uzun süre boyunca bu kadar az şey yaşandığı görülmemiştir”.

Aslında bu büyük ölçüde sıkıcı milyarda ve hemen öncesinde birkaç önemli olay meydana geldi. Yaklaşık 1,9 Ga önce, çıplak gözle görülebilen ilk tekil organizmalar ortaya çıktı. Birkaç santimetre çapında (*Grypania* adı verilen) spiral biçimli fosiller bırakan bu canlılar büyük ihtimalle deniz yosunuydu. Çin’de bulunan, organik duvarlara sahip ve 0,05 mm’den büyük bir tür fosil olan *akritarklar* 1,8 Ga öncesinden kalmadır. Bunlardan bazılarının, kuru dönemlerde alglerin aktif olmayan toplara dönüşerek oluşturduğu alg sistleri olduğu düşünülüyor. Yeni soylar da belirmeye başladı, 1,2 Ga önce ortaya çıkan ve büyük ihtimalle eşeyli üreyebilen kırmızı algler gibi. Günümüzde kırmızı algin soyundan gelen canlıları dondurmanın kıvamını artırmak için kullanılan agar maddesini üretmek için, nori adındaki bir türünü ise suşi sarmak için kullanıyoruz. Ayrıca, o arada cinsellik de keşfedildiği için sıkıcı milyar *o kadar da sıkıcı* değildi.

Yaklaşık 750 Ma önce başlayan istikrarsız bir sürecin ardından, atmosferik oksijen 580 Ma önce ikinci kez artarak yüzde 3’ü aştı ve derin deniz tamamen oksijenlendi. 630 Ma öncesinden kalma hayvan biyobelirteçleri ve küçük fosiller (muhtemelen süngerler) mevcut olmakla birlikte, santimetrelerden metrelere ulaşan büyüklükteki karmaşık fosilleri ancak 580 Ma öncesinden itibaren bulabiliriz. Bunlar ağzı veya kasları olmayan garip, yumuşak vücutlu organizmalardır; besinlerin deriden difüzyonuyla beslenmiş olmaları muhtemeldir. Bazıları pizzayı andırırken bazıları da eğreltiotuna benzer. Fakat güneş ışığının ulaşamayacağı kadar derinlerde yaşayan bu organizmaların bitki olmaları mümkün değildir. İlk olarak Güney Avustralya’daki Ediacara tepelerinde net bir şekilde tespit edildikleri için topluca *Ediacara (Edikara) biyotası*

olarak adlandırılır. Bu organizmalar soyları tükenmeden önce on milyonlarca yıl varlıklarını sürdürdüler.

Daha sonra *Kambriyen Patlaması* gerçekleşti. 541 Ma önce Kambriyen Dönemi'nin başlamasıyla birlikte, sonraki 10 ila 30 milyon yıllık aralıkta yeni beden yapılarına sahip hayvanlar nispeten hızlı biçimde ortaya çıktı. Sert iskelete sahip pek çok hayvan da dahil olmak üzere, en modern hayvan gruplarının temsilcileri de ilk olarak bu dönemde görüldü. Kambriyen (541-488 Ma önce) Pretorozoik Devir'in bitişinden hemen sonra gelir ve Fanerozoik Devir'in (541 Ma öncesinden günümüze) ilk evresidir. Yunanca *phaneros* (görünür) ve *zoion* (hayvan) sözcüklerinden türetilen Fanerozoik kelimesi “görünür hayvanlar” anlamına gelir. Küçük bir Kambriyen canlısı olan *Pikaia* birkaç santimetre uzunluğunda bir çeşit yüzen solucandır. *Pikaia* muhtemelen biz de dahil tüm omurgalıların evrimleştiği bir grubun bir parçasıydı.

İkinci oksijen artışı çeşitli hayvanların ortaya çıkmasına olanak sağladı, ama artışın nedeni tam olarak bilinmiyor. Öne sürülen tahminlerden birine göre, organik karbon gömülümü (ve buna bağlı oksijen üretimi) çeşitli etkenler sonucunda hızlandı. Bunlar yeni karasal yaşamın yüzeylerin parçalanmasını ve besinlerin ortaya çıkışını artırması, deniz zooplanktonlarının evrimi ve organik maddenin gömülmesine yardımcı olan killerin üretimindeki artış gibi etkenlerdir. Bir diğer tahmine göreyse, “sıkıcı milyar” boyunca atmosferde milyonda 100 birim gibi ortalama bir seviyede bulunan metan gazının uzaya hidrojen kaçışını daha da tetiklemesiyle beraber deniz tabanı oksitlendi ve ikinci küresel oksijen artışına neden oldu.

Yaklaşık 400 Ma önce, damarlı bitkiler kıtaları kaplayınca üçüncü bir oksijen artışı görüldü. Bu bitkilerin su ve mineral taşımaya yarayan (odun gibi) özel dokuları bulunur. Bu dokular besin üretimini ve organik gömülümü (toprak yüzeyini köklerle delerek) artırmış olmalı. Bunun ardından, atmosferik oksijen seviyesi yüzde 10 ile 30 arasındaki seviyelerde kalarak hayvanların

soylarını sürdürmesine ve nihayetinde bizim ortaya çıkmamıza olanak sağladı.

Kartopu Dünya mı, Sukuşağı Dünya mı?

İlginçtir, global buzullaşmalar hem Büyük Oksidasyon Olayı hem de ikinci oksijen artışıyla bağlantılıdır, adeta “sıkıcı milyara” iki yandan destek olan kitap tutucular gibi. Bazı biliminsanları bu dönemlerde Dünya okyanuslarının tamamen buzla kaplandığını öne sürüp yeryüzünün bu evresini *Kartopu Dünya* olarak adlandırmıyorlar. Bu evre, son birkaç milyon yılda görülen ve yalnızca orta enlemlere erişen, dönencelere ulaşmayan buz çağlarına kıyasla çok daha sertti. Genel bağlamda bakarsak, Proterozoik Devir üç döneme ayrılmıştır: Paleoproterozoik (2,5-1,6 Ga önce), Mezoproterozoik (1,6-1 Ga önce) ve Neoproterozoik (1-0,541 Ga önce). Jeologlar Paleoproterozoik başlangıcında gerçekleşen üç-dört buzullaşmayı “Paleoproterozoik buzullaşma”, daha sonra gerçekleşen iki büyük ve bir küçük buzullaşmayı ise “Neoproterozoik buzullaşma” olarak adlandırırlar.

Kaya kayıtları bu global buzullaşmanın kanıtıdır. Buz tabakalarının akışı taş, kum ve çamuru karıştırarak *tillit* adı verilen bir kayaya dönüştürür. Buzullar ayrıca altlarındaki kayanın üzerinde paralel çizgiler de bırakır. Dahası, buzdağlarından veya eriyen buz katmanlarından düşüp aşağılara ulaşan ve *damlataş* olarak adlandırılan taşlar tortul yatakları bozar. Tillitlerin, buzul çizgilerinin ve damlataşların beraber görülmesi, bir zamanlar o bölgede buz katmanlarının bulunduğuun tartışmasız kanıtlarıdır.

1980’lerde ve 1990’larda gerçekleştirilen manyetik ölçümler de buzulların dönencelere dek uzandığını ortaya koydu. Pusulalar Dünya’nın kuzey-güney manyetik alanını gösterir. Manyetik alan çizgilerinin kutupların yakınında yüzeye neredeyse dik açıdayken, ekvator yakınlarında yüzeye paralel olduğu olgusu ise daha az aşikârdır. Volkanik kayalar manyetik gibi demir mineralleri içe-

rir; kayalar soğuduğunda bunlar bulundukları yerdeki manyetik alan doğrultusunda mıknatıslanır. Dolayısıyla, tutsak veya artakalmış manyetik alanlar kadim kaya yataklarına paralel olduğunda, bu kayaların dönencelerde oluştuğunu anlarız. Neoproterozoik ve Paleoproterozoik buzullaşmalardan kalan kayalarda tam da bu durum görüldü.

Buzlanmış denizler dönencelere ulaşırsa bütün yeryüzünün donacağı fikri 1960'larda ortaya çıktı. Mikhail Budyko adındaki Rus iklimbilimci, kutup buzul başlıkları ekvatora 30° enleminden daha fazla yaklaşırsa tüm Dünya'nın donacağını hesapladı. Buz güneş ışığını epey yansıtır, yani yüksek bir *albedoya* (0 ile 1 arasında bir kesir) sahiptir. Günümüzde Dünya'nın albedosu yaklaşık 0,3'tür, bu da güneş ışığının yüzde otuzunun uzaya yansıtıldığı anlamına gelir. Ama deniz buzu güneş ışığının yüzde 50'sini, buzun üstü karla kaplı olduğundaysa yüzde 70'ini yansıtabilir. Eğer dönencelerdeki yüksek albedolu buz Dünya'nın daha az güneş ışığı emmesine ve soğumasına yol açarsa, buz miktarındaki artış Dünya'yı daha da soğutur ve bu şekilde devam eder; böylece buz-albedo geribildirimini kontrolden çıkarak bir felakete neden olur. Ortaya çıkan yapı, ortalama sıcaklığı -35°C'nin altında, buz kalınlığı ekvator da 1,5 km kutuplardaysa 3 km olan donmuş bir küredir.

Kartopu Dünya tabirini ortaya atan Joe Kirschvink (California Teknoloji Enstitüsü) bu Kartopu Dünya'nın nasıl eriyebileceğine dair bir fikir de ortaya attı. Yanardağların buzları delip geçerek atmosfere karbondioksit salabileceğini öne sürdü. Yağış görülmediği ve karbondioksiti çözebilen kayda değer açık okyanuslar bulunmadığı için birkaç milyon yıl boyunca bu gaz birikmeye devam edecekti, ta ki artan sera etkisi Kartopu'nu eritinceye dek. Ayrıca, kalın kutupsal buzdan ince tropikal buza doğru seyreden buz akışı beraberinde volkanik külleri ve rüzgârla savrulan toz tabakasını getirecekti, böylece dönenceler daha karanlık hale gelirken Kartopu'nun da erime eğilimi artacaktı. Sonrasındaysa buz-albedo geribildirimini tersine işleyecek, daha az buz Dünya'yı daha

ılıman kılacak, daha çok buz eriyecek ve bu böyle devam edip gidecekti.

Buzul kalıntılarının üst kısımlarında bulunan karbonatlı kayaç katmanlarının Kartopu Dünya'dan geriye kalanlara işaret ediyor olması muhtemeldir. Bir görüşe göre, buzların erimesinin ardından büyük miktarda karbondioksit, karbonatlı kayaç katmanlarına dönüşmüş olmalı. Kartopu Dünya hipotezini savunanlar karbonatlardaki karbon-12'nin karbon-13'e oranının volkanik karbondioksitteki benzer olduğuna işaret ediyor.

Kartopu Dünya hipotezinin temel problemi, güneş ışığına ihtiyaç duyan fotosentetik alglerin kalın buzun altında nasıl hayatta kaldıkları sorusudur. Yeşil ve kırmızı alglerin soyları Neoproterozoik "kartopları" boyunca hiç hasar almadan devam etti. Bir açıklamaya göre, yanardağların etrafındaki ısı açık denizlerin veya ince, saydam buzların oluşmasına olanak tanımış olmalıydı. Ama bazı biliminsanları tüm Dünya'nın gerçekten donduğundan şüphe duyuyor. Dünya'nın bu çağlardaki iklimini ortaya koyan gayet gelişmiş bazı bilgisayar simülasyonları, açık denizden oluşan bir dönence kuşağı –*Sukuşağı Dünya*– üretti; çünkü bu kısımlarda ortalama albedoya sahip çıplak buzlar bulunurken, karla kaplı ve hayli yansıtıcı buzlar yalnızca yüksek enlemlerde görülüyordu.

Ne olmuş olursa olsun, hem Neoproterozoik hem de Paleoproterozoik buzullaşmanın nedeni muhtemelen sera etkisinin azalmasıydı. Levha hareketleri yüzünden kıtalar sürüklenmiş ve kartopu dönemlerinden önce dönencelerde toplanmış olmalı. Tropikal kıtalara düşen yağış belki de karbondioksit seviyesini normalin altına düşürmüştü ve Dünya'yı buzullaşmaya uygun hale getirmişti. Oksijen artışı ve buzullaşma dönemlerinin çakışması da bir başka sera gazının, metanın da bu durumu tetiklemiş olabileceğine işaret ediyor. Oksijendeki artışlar metandaki hızlı azalmayla da ilişkili olmalı çünkü birbiriyle tepkimeye giren bu iki gazın aynı anda yüksek miktarda bulunması mümkün değil.

Astrobiyolojinin Kartopu Dünya'dan çıkarması gereken ders,

Dünya benzeri bir gezegendeki biyosferin dirençli olacağıdır. Büyük iklimsel salınımlara rağmen Dünya üzerindeki yaşam varlığını sürdürdü ve Neoproterozoik çağı hayvanların çağı takip etti.

Gelişmiş Yaşamın Ortaya Çıkışı

Astrobiyolojide sık sık, galakside bir başka yerde hayvan benzeri bir yaşam biçiminin var olup olmadığını merak ederiz. Dünya'daki evrim bize bu olasılık hakkında bilgi verebilir. Karmaşık hale gelebilmek için karasal yaşamın aşması gereken iki büyük engel vardı. İlk olarak, canlıların karmaşık hücrelere sahip olması gerekiyordu ki büyük ölçekte farklılaşma mümkün olabilsin – örneğin işlevsel ayrımlara sahip karaciğer ve beyin hücreleri gibi. Büyük, üç boyutlu çokhücreli hayvanlar ve bitkiler yalnızca *ökaryotik* hücrelerden oluşur; bu hücreler mikrobiyal hücrelerle kıyaslandığında çok daha çeşitli hücre tipleri geliştirebilir (5. Bölüm).

Hayvanlar için gerekli ikinci koşul da, bizimki gibi *aerobik* (oksijen kullanan) bir metabolizmayla yüksek enerji üretebilmek için yeterli oksijene sahip olmaktır. Büyümek ve hareket etmek için hayli fazla enerji gerekir. Oksijen kullanmayan *anaerobik* metabolizma aynı besin miktarıyla aerobik metabolizmanın ürettiği enerjinin yaklaşık onda birini üretebilir. Dünyadışı yaşamda, yüksek enerji seviyelerine ulaşmak için oksijen yerine flor ve klor gibi güçlü oksidanların kullanılıp kullanılamayacağını merak edebiliriz. Bunun yanıtı olumsuzdur. Flor o kadar reaktif yani tepkimeye açıktır ki organik maddeyle bir araya geldiğinde patlar, klor ise çözünüp zararlı bir madde olan çamaşır suyunu oluşturur. Görünüşe göre periyodik tabloda karmaşık yaşam için en iyi yaşam iksiri oksijendir, yeterince reaktif ama çok saldırgan değil.

Oksijenin yalnızca ortamda bulunması yetmez, yoğunluğunun da yüksek olması gerekir. İlk aerobik çokhücreli yaşam, bölünen hücreler birbirinden ayrılmayı başaramayınca ortaya çıkan hücre birikiminden oluşuyordu muhtemelen. Bu birikimlerin büyüklüğü

en iç kısımdaki hücrelere difüzyonla ulaşabilen oksijenle sınırlıdır, bu yüzden dışarıda daha yüksek oranda oksijen olması daha büyük hücre gruplaşmalarına olanak tanır. Tipik metabolik hızlarda, difüzyonla sınırlanmış boyutları birkaç milimetre civarında olan bir hayvan öncülünün yüzde 3'ü aşan oksijen yoğunluğuna ihtiyacı vardı. Bu da yaklaşık 580 Ma önce hayvanların ortaya çıkışını sağlayan oksijen artışına tekabül eder.

Alg fosilleri ökaryotların hayvanlardan çok daha önce var olduğunu gösteriyor, demek ki Kambriyen Patlaması'na kadar geçen uzun zaman yeterli oksijene ulaşmak için gerekliydi. Hatta karmaşık hayvan yaşamına yetecek oksijen seviyesine ulaşmak için gereken *oksijenlenme zamanını* tespit etmek bile mümkün. Dünya' da bu süre gezegenin oluşumunu takip eden 4 milyar yıldır.

Dünya'da bu zaman aralığını neyin belirlediğini tam olarak bilmediğimiz için Dünya benzeri ötegezegenlerin oksijenlenme zamanlarını da bilmiyoruz. Fakat oksijenin sıvı sudan geldiğini biliyoruz. Demek ki, okyanusları olan Dünya benzeri ötegezegenlerde suyu parçalayan fotosentez evrimleşirse, bu gezegenlerin oksijen zengini atmosfer geliştirme potansiyelleri de olur. Eğer bir ötegezegende oksijenle tepkimeye giren maddeler bulunduğu için oksijenlenme zamanı uzayarak 12 milyar yılın üstüne çıkarsa, hayvan yaşamı için uygun koşullar oluşmadan Güneş benzeri ana yıldız bir "kırmızı dev"e dönüşecek ve gezegen mikrobiyal çamurdan daha karmaşık bir şeye sahip olamayacaktır. Fakat oksijenlenme süreleri daha kısa olan ötegezegenler varsa, bunlarda karmaşık yaşam Dünya'dakinden daha hızlı bir biçimde ortaya çıkabilir.

Evrin Trendleri? Kitlesele Yok Oluşlardan Çıkan Ders

Hayvanlar evrimleştikten sonra, evrimin basitten daha karmaşığa doğru ilerleme eğilimine sahip olup olmadığını sorabiliriz. Karasal yaşamı ele alalım. İlk bitki sporları yaklaşık 470 Ma önce görülürken, bitki kısımlarının fosilleri yaklaşık 425 Ma öncesinden

kalmadır. Böcekler 400 Ma önce karada görülmeye başladı. Yaklaşık 365 Ma önce balıklar amfibilere evrildi; onlardan türeyenler de nihayetinde sürüngenlere ve bizim de içinde bulunduğumuz memelilere dönüştü. Bu, biyosferin Dünya'nın kaynaklarını git-tikçe daha fazla kullanma eğiliminde olduğunu gösterir. Ama ev-rimi bizimle son bulan istikrarlı bir ilerleme olarak düşünmek doğru değil. Fosil kayıtları türlerin gelip geçtiğini gösteriyor. Kit-lesel yok oluşlar da karmaşık yaşamın çeşitliliğini belirli aralık-larla azaltıyor. Bunlar familyaların (türlerin ve cinslerin üstündeki kademe) yüzde 25'inden fazlasının yok olduğu olaylardır (bkz. 5. Bölüm). Bu kitlesel yok oluşlar tabii ki biyosferin mikrobiyal ol-mayan kısmı için geçerli.

Çeşitlilikte ciddi bir artış ancak Proterozoik-Fanerozoik geçişi civarında görüldü çünkü organizmaların o dönemde kazandıkları yeni vücut mimarileri ve yaşam biçimleri kalıcı oldu. Hayvanlar-da önemli bir yenilik vücut boşluğunun (sölom), sağlamlık sun-mak için sıvıyla dolabilen ve kaslardan gelen kuvvetin yoğunlaş-masını sağlayabilen bu yapının ortaya çıkışıydı. Bu da kendi ba-şına hareket edebilmeyi kolaylaştırdı; önce dış kısımda ve daha sonra iç kısımda evrimleşen sert iskelet bunu daha da geliştirdi. Av-avcı evrimsel silahlanma yarışı da Kambriyen Patlaması'nda hayvan çeşitliliğinin artmasına katkıda bulunmuş olmalı. Taşıma için gereken sağlam hücrelere sahip damarlı sistemlerin ve bu-nunla ilişkili diğer işlevleri gerçekleştiren organların gelişmesiyle bitki çeşitliliği de arttı ve nihayetinde ağaçlar ortaya çıktı.

Geçtiğimiz 500 milyon yıl boyunca en büyükleri sırasıyla 251 Ma ve 65 Ma önce olmak üzere beş kitlesel yok oluş gerçekleşti ve türlerin yüzde 50'den fazlası bu olaylar sırasında ortadan kalk-tı. Krokodilyenleri dışarıda bırakırsak, evcil bir köpekten daha büyük boyuttaki hiçbir hayvan Permien (299-251 Ma önce) ve Triyas (251-200 Ma önce) devirlerini ayıran en büyük olaydan sağ kurtulamadı. Bu olay okyanuslara büyük hasar verdi. Örneğin trilobitlerin –Kambriyen denizlerinin sembollerinin– sayısı azal-

maktaydı ama Permilen-Triasik veya Permilen-Trias yok oluşu onları tamamen bitirdi. 65 Ma önce gerçekleşen ikinci büyük olay ise dinazorları ortadan kaldırıp Kretase (145-65 Ma önce) ve Paleosen (65-23 Ma önce) devirlerini ayırdı. (Literatürün bir kısmında bu olay geçmiş bir isimlendirme sistemine dayanılarak Kretase-Tersiyer olarak da adlandırılır). Permilen-Trias kitlesel yok oluşu deniz türlerinin yüzde 95'ini ve kara hayvanlarının yüzde 70-80'ini yok ederken, Kretase-Tersiyer yok oluşu tüm türlerin yüzde 65-75'ini ortadan kaldırdı.

Görünen o ki Permilen-Trias kitlesel yok oluşunun nedeni Dünya'nın kendi kendine tetiklediği bir talihsizlikler zinciriydi. Tetikleyici unsur, Avrupa'ya yakın büyüklükte bir alan kaplayan Sibirya yanardağlarının etkinliğiymiş gibi görünüyor. Bu bölgenin altında kömür yatakları olduğu için, yanardağ hareketleri yüksek miktarda kömür kökenli metan ve karbondioksit sera gazlarını ortama püskürtüp okyanusu ısıtmış ve asidik hale getirmişti. Oksijen sıcak suda daha az çözünür; bu yüzden de ortaya çıkan asidik okyanus zehirli hidrojen sülfür gazını yüzeye çıkarmış olabilir. İklimsel ısınma, okyanusun asidikleşmesi ve zehirli gazların bir araya gelişi, Fanerozoik Devir'deki herhangi bir olaydan daha fazla sayıda yaşamın yok olmasına neden oldu.

Kretase-Paleosen kitlesel yok oluşuna 10 km çapında bir asteroidin Dünya'ya çarpmasının neden olduğu düşünülüyor. Bu olayın tahripkâr sonuçlarından bazıları, ozon tabakasının bir süreliğine ortadan kalkışı, küresel orman yangınları, asit yağmurları ve stratosferde oluşan sülfat partiküllerinin güneş ışığını yansıtmasından kaynaklanan iklimsel soğumadır. Çarpışma krateri, Chicxulub (Şiksulub diye okunur) adındaki Meksika kasabasının yakınlığında, yerin bir kilometre altında bulunmuştur.

Tükenişler bir zamanlar başarı sağlamış soyları ortadan kaldırır ancak diğerleri için de fırsatlar sunar. Bu kitabı Chicxulub çarpışması sayesinde okuyorsunuz. Dinazorlar ortadan kalkmasaydı memeliler baskın hale gelemezdi.

Diğer yandan, kitlesel yok oluşlar gelişen uygarlıkların ortadan kalkabileceği anlamına gelir. Kretase-Paleosen yok oluşuna yol açan çarpışma büyüklüğündeki çarpışmalar aşağı yukarı her yüz milyon yılda bir gerçekleşiyor olmalı. Buradan çıkan sonuç, sırf bunun gibi rasgele felaketler yüzünden, ötegezegenlerdeki uygarlıkların evrenin yaşına kıyasla kısa ömürlü olabileceğidir. Dolayısıyla Dünya benzeri bir gezegen yaşam için uygun bir mesken olarak varlığını sürdürebilir, ama uygarlıklar muhtemelen gelip geçicidir. Dünyadışı zekâya dönük astronomik arayışlarda bunun sonuçlarını dikkate almak gerekir.

Yaşam: Bir Genomun Daha Fazla ve Uyum Başarısı Daha Yüksek Genomlar Yapmasının Yolu

Dünya'da Yaşam: Tepeden Görünüş

Birinci Bölüm'de yaşamın genel bir tanımını sundum, ama eğer dünyadışı gezegenlerde yaşam arıyorsak kendi gezegenimizdeki yaşam örneğinin detaylarını bilmek bize yardımcı olacaktır. Bu amaçla, önce yeryüzü biyolojisine küresel bir perspektiften bakıp daha sonra hücre ve moleküllere doğru ilerleyebiliriz.

Yıldızlar arası bir yolculuk sonucunda Dünya'ya ulaşan ve biyolojimizi öğrenmek isteyen birini hayal edin. Belki de kendi gezegenindeyken nemli ve sıradışı derecede oksijen zengini atmosfere sahip Dünya'da yaşam olacağı sonucuna vardı veya on yıllar önceki TV yayınlarını yakaladı ve ertelemeyen burayı ziyaret etmeye karar verdi. Şaşırtıcı bir şekilde (tıpkı filmlerde uzaylıların hep yaptığı gibi) İngilizce konuşuyordu ve şansa bakın ki uzay mekiği İngilizce konuşan bir ülkeye indi. Ona ne söyledik?

Küresel düzeyde Dünya'nın *biyosferi* tüm canlı ve ölmüş organizmaların toplamıdır. Bazen bu terim, canlıların yaşadığı cansız bölgeleri de kapsar. Biyosferdeki milyarlarca tonluk karbonu ölçerek onun çeşitli bileşenlerini belirleyebiliriz. Karadaki biyokütle yaklaşık 2000 milyar ton karbona denktir ve bunun yüzde 30-

50'si canlıyken, geri kalanı ölüdür. Okyanusta 1000 milyar tonluk biyokütle karbonunun yalnızca yüzde 0,1-0,2'si canlıdır. Karada okyanuslardan çok daha fazla canlı biyokütle bulunmasının nede-niyse ormanların varlığıdır.

Dünyadışı yaşama ilişkin açıklığa kavuşturulamamış bir konu da Dünya'nın *yüzeyaltı biyosferinin* veya derin yeraltı yaşamının boyutudur. Bazı biliminsanları deniz tabanının bir-iki kilometre altında ve toprağın üç kilometre, hatta daha derinlerinde devasa bir mikrop kütlesi olduğunu öne sürüyor. Bu derinliklerde yaşamı sınırlayan şey sıcaklıktır. Aşağılara indikçe sıcaklık gitgide artar (madenciler bunu iyi bilir), ortam bir noktada en dayanıklı mik-roplar için bile çok sıcak hale gelir. Dünya'nın yüzeyaltı biyosfer biyokütlesi belirlenmiş değil çünkü henüz bütün yüzeyaltı ortamlarda derin sondaj çalışmaları yapılmadı, ama yüzeyaltı biyoküt-lesinin Dünya'nın canlı biyokütlesinin yüzde 1 ila 30'unu oluştur-duğu düşünülüyor.

Kesin kütlesi ne kadar olursa olsun, biyosfer Dünya'nın kütle-sinin milyarda birinden azını oluşturur, ama yüzey ortamının kim-yasını muazzam biçimde etkiler. Bunu mümkün kılan şey, biyos-ferin büyük miktardaki materyali hızlı bir biçimde işleyebilmes-i-dir. Bu arada bireyler jeolojik zaman dilimlerine kıyasla neredey-se anlık ömürler sürerler. Mikroplar genel olarak onlarca dakika-dan günlere kadar uzayan bir aralıkta ürerken, büyük çokhücreli organizmalar en fazla birkaç bin yıl boyunca hayatta kalıp ardın-dan mikrobiyal bozunma için ölü yem haline gelirler. Örneğin, klonal olmayan en yaşlı organizma MÖ 3049 civarında, en eski Mısır piramitlerinden birkaç yüzyıl önce, California'daki White Mountains'da filizlenen Bristlecone Çamı'dır, ancak o da jeolojik zamanda bir noktadır yalnızca.

Günümüz biyosferindeki ana etkinlikler oksijenli fotosentez ve bunun kimyasal tersinmesi olan oksijenli solunum ve oksidas-yondur (4. Bölüm). Ama mikropların çok çeşitli başka metaboliz-maları da vardır ki, bunlardan daha sonra bahsedeceğiz.

Mikroplar tabii ki Dünya yüzeyindeki neredeyse her yerde bulunurlar. Bir deniz ve tatlı su bakterisi olan *Pelagibacter ubique*, muhtemelen Dünya üzerinde en çok bulunan organizmadır. Buna rağmen, bu canlının ilk olarak 2002’de tanımlanabilmiş olması biyolojinin hâlâ gelişme aşamasında olduğunu gösteriyor. Okyanusta pek çok türden 10^{29} mikrop vardır; bu sayı gözlemlenebilir evrendeki yıldızların sayısından (10^{22} yıldız) fazladır. Kara üzerinde de çok sayıda mikrop bulunur. Bir gram üst toprakta yaklaşık 100 milyon ila 10 milyar mikrop bulunur. Genellikle, kapalı mekânlardaki havada metreküp başına bir milyon bakteri bulunur. Stratosfer’in yerden 32 kilometre yüksekteki bir katmanından alınan her 55 metreküpte bile ortalama bir (ölü) mikrop bulunur.

Dünya’nın yaşamla dolup taşmasına olanak sağlayan dört kilit özellik vardır. En önemlisi sıvı suyun yaygın biçimde bulunmasıdır. Metabolizmaya sahip tüm organizmalarda sulu solüsyonlarda çözünmüş organik moleküller bulunur. Dolayısıyla Venüs gibi tamamen kuru bir yüzeyde yaşamın var olmasını beklemeyiz. İkinci temel özellikse metabolizma için enerjiye sahip olmaktır. Güneş ışığı Dünya biyosferinin temel kaynağıdır, ama bazı organizmalar karanlıkta gerçekleşen kimyasal tepkimelerden enerji elde ederler, bu yüzden Mars veya Europa’nın yüzeyinin altında mikrobiyal yaşama benzer bir yaşamın var olması imkânsız değildir. Yaşamı olanaqlı kılan üçüncü özellikse temel kimyasal elementlerin yenilenebilir bir stoğunun olmasıdır. Doğal döngülerle (su döngüsü veya tektonik gibi) yaşamsal elementleri yerine koyamayan gezegenler ölümcüldür. Yaşam için temel önem taşıyabilecek dördüncü özellikse, katılar, sıvılar ve gazlar için arayüzlerin varlığıdır. Karada veya okyanus yüzeyi gibi stabil bir arayüzde yaşamak avantajlıdır. Jüpiter gibi sabit bir yüzeye sahip olmayan bir gaz devinde yaşamın var olmasının zorluğunun nedeni budur. Jüpiter’in atmosferindeki belli bir yükseklikte yaşamın var olabileceği öne sürülebilirse de, konveksiyon kaynaklı derin çalkalanmalar yaşamı periyodik olarak ölümcül bir ısı ve basınca sahip iç kısma çekecektir.

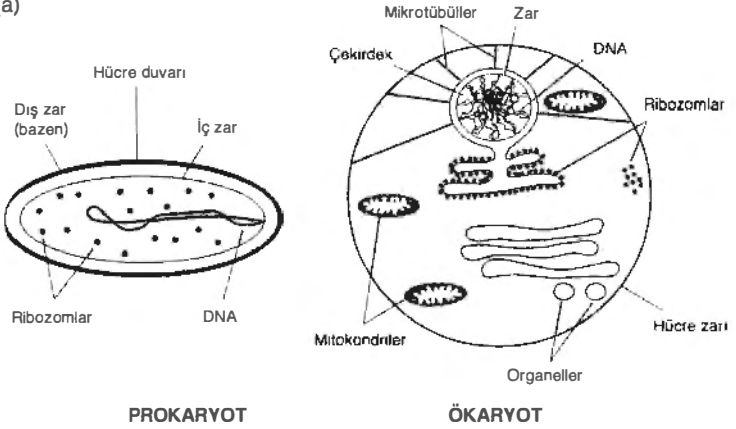
Yeryüzündeki Yaşamın İçeriden Görünüşü: Hücre

Biyolojiyi küresel ölçekte değerlendirdik ama mikroskop altında tüm organizmalar farklı tipteki hücrelerden oluşur. Organizmalar bu tiplere göre üç üst âleme (*domain*) ayrılır: *Ökaryotlar*, *Arkeler* ve *Bakteriler*. Mikrobiyal olan son ikisi bazen *prokaryotlar* adı altında bir araya getirilse de, pek çok mikrobiyolog bu tabirin eskidiğini çünkü arke ve bakterilerin birbirlerine biyokimyasal olarak benzemediklerini vurgular. Arke ve bakteri hücrelerinde DNA serbestçe yüzerken, ökaryotlarda DNA zarla çevrili çekirdeğin içinde bulunur. Arke ve bakteriler tekhücrelidir, istisnai bazı bakteri türleriye art arda dizilip filamentleri oluşturur. Ökaryotlar tekhücreli olabilir (amip veya yaş maya gibi) ama yalnızca ökaryotlar büyük, üç boyutlu ve çokhücreli organizmalar oluştururlar (mantarlar ve insanlar gibi).

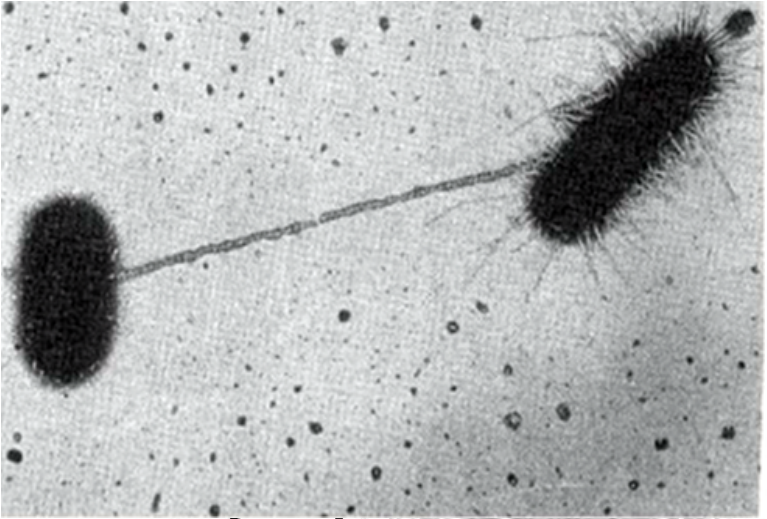
Canlıların üç üst âleme ayrılması genetik temellidir ve eski “beş âlem” sisteminin –bitkiler, hayvanlar, mantarlar, protistalar (tekhücreli ökaryotlar) ve bakteriler– yerini almıştır. Ancak bu eski terimler taksonomide hâlâ kullanılır; bu sisteme göre, belli bir üst âleme ait bir organizma, Âlem, Şube, Sınıf, Takım, Familya, Cins ve Tür’e göre sınıflandırılır. Örneğin bir insanın taksonomik sınıflandırılması hayvanlar âlemi, kordalılar şubesi, memeliler sınıfı, primatlar takımı, insangiller familyası, *Homo* cinsi ve *sapiens* türüdür. Bize *biyoloji* kelimesini armağan eden İsveçli bitki bilimci Carolus Linnaeus (1707-78), organizmaların ikili isimlerle tanımlandığı (örn. *Homo sapiens*) modern taksonomiye geliştiren kişidir. Fakat yaşamın biyokimyasal birliği ve genetik ortak atalar ancak evrim teorisinin ve moleküler biyolojinin gelişimiyle ortaya çıkarılabilmektedir.

Ökaryotlar ve diğer iki üst âlem arasında benzerlikler olsa da, karmaşıklık bakımından birbirlerinden ayrılırlar. Bakteriler ve arkeler genelde 0,2-5 mikron (metrenin milyonda biri) boyutunda-

(a)



(b)



Şekil 4. a) Prokaryot (arke ve bakteri) ve ökaryot yapılarının şematik karşılaştırması; b) Konjugasyon yapan iki bakteri

dır, ökaryotlarsa nadir istisnalar dışında genellikle daha büyüktür (10-100 mikron). Daha büyük olan ökaryotik hücrelerde özelleşmiş işlevleri yerine getiren, insan vücudundaki organlara benzeyen organeller bulunur (Şekil 4). Örneğin *mitokondri* solunumu gerçekleştirir. Bitki veya alg hücrelerinde *kloroplast* fotosentezi gerçekleştirir. Tüm hücrelerde ortak olarak bulunan bir özellik ise, hepsinde çok sayıda ribozom, yani protein üreten küresel yapılar bulunmasıdır. Örneğin prokaryot veya maya gibi basit ökaryot hücrelerinde binlerce ribozom bulunabilirken, hayvan hücresinde bu sayı birkaç milyona ulaşabilir.

Astrobiyolojinin karmaşık dünyadışı yaşama dönük ilgisi çerçevesinde, neden sadece ökaryotik hücrelerin büyük, üç boyutlu çokhücreli yaşamı ürettiğini sorgulayabiliriz. Her ne kadar cevabı tam olarak bilmesek de, ökaryotik hücrelerin içinde arkelere veya bakterilere kıyasla daha incelikli bir dinamik hücre iskeleti veya sitoiskelet bulunur. Bu hücrelerde mikrofilamentler, küçük protein tüpleri (“mikrotübüller”) ve moleküler motorlar bulunur; bunlar hücre yapısını kontrol eder ve hücre fizyolojisinin değişimi için sinyal moleküllerinin taşınmasına yardımcı olur. Yani ökaryotik hücrelerde pek çok özelleşmiş biçim geliştirebilme yetisi vardır. Siyanobakteriler farklı tipteki yüzlerce hücrenin art arda dizilmesiyle filamentler oluşturabilirler, ama bundan öteye gidemezler. Arke ve bakterilerden farklı olarak, ökaryotlar daha büyük ve daha modüler genomlara sahiptir, bu da daha fazla karmaşıklığa sahip olmalarını sağlar. Eğer ökaryotik hücreler olmasaydı, yeryüzü daha sıkıcı bir yer olurdu. Dünyamızdaki tanıdık organizmaların hiçbiri –hayvanlar, bitkiler ve mantarlar– var olmazdı. Yani ötegezegenlerdeki karmaşık yaşamı düşündüğümüzde, evrimin ökaryot benzeri hücreleri Dünya dışında da oluşturup oluşturamayacağını sorgulamalıyız. Bu nedenle ökaryotların kökeni büyük önem taşıyor.

Modern genetik, ökaryotik hücrenin evrim tarihi boyunca bakteri ve arke parçalarının bir araya gelmesiyle oluşmuş bir yapı, bir

nevi “Frankenstein’in canavarı” olduğunu ima ediyor. Örneğin ökaryotik hücrelerdeki mitokondri, başka bir hücrenin içinde simbiyotik yaşam süren bir bakteriden türemiştir. Bir arke veya artık var olmayan bir “proto-ökaryot” olan büyük hücre, serbest yaşayan bakteriyi içine alarak tarihin en önemli lokmasını yutmuştur. Böylece mitokondrinin atası ortaya çıkmıştır. Bitki ve alg hücrelerinde bulunan kloroplastların kendine özgü DNA’sı, kloroplastların da benzer şekilde simbiyotik bakterilerin büyük hücrelerin içinde yaşamaya başlamasıyla oluştuğunu gösteriyor. Yeşil bitkilerin yapraklarındaki tüm hücrelerde, çok uzun zaman önce tutsak ve temellük edilmiş siyanobakteriyel kölelerin torunları vardır. Ökaryotik hücrelerdeki mitokondri, kloroplast ve diğer organellerin kökenini bu şekilde açıklayan teoriye *endosimbiyoz* adı verilir.

Ökaryotların bulunmadığı bir dünyada cinsel ilişki de olmazdı. Çiçeklerin ve aşk şarkılarının olmadığını düşünün. Arkelerin ve bakterilerin cinsiyeti yoktur, ama iki hücre yan yana gelip konjugasyon gerçekleştirebilir. Hücreler plazmid adı verilen DNA parçalarını aralarında oluşturdukları bir tüp vasıtasıyla karşı tarafa aktararak gen aktarımını gerçekleştirirler. Bakteriyel yüzeylerde pilus adı verilen çıkıntılar bulunur; konjugasyon sırasında özel bir pilus partnere uzanır ve kanalı oluşturur (Şekil 4). Ökaryotlardaki eşeyli üremeden farklı olarak mikrobiyal birleşme yeni döl oluşurmaz, hızlı ve kolayca gerçekleşir. Bir kafede kıvılcıqlı birine değdiğinizde kırmızı saç geni edinip saçınızın renginin ânında değişmesi gibi bir şeydir bu. Arkeler ve bakteriler transformasyon (çevreden yabancı DNA almak) ve transdüksiyon (virüslerin aracılık ettiği gen değiş tokuşu) yoluyla da yeni genler edinebilirler. Genlerin kazanımının hızlıca gerçekleşmesi, antibiyotiklere direnük bakteriyel direncin çabucak gelişebilmesini sağlar.

Cinsiyete sahip ökaryotlar gametler (yani sperm ve yumurta hücreleri) oluştururlar. Çok hücreli, karmaşık ökaryotlarda yaşamın çeşitliliği “erkek” ve “dişi”nin tanımlanmasını beklenmedik derecede zorlaştırarak bizi şu garip tanımla baş başa bırakır: Kü-

çük gametleri üretenler erkek, büyük gametleri üretenler dişidir. Gametler birleşir, bu yüzden genlerin yarısı babadan yarısı anneden gelir. DNA genelde gevşek bir helezon biçimindedir ama hücre bölünmeden önce DNA kıvrılıp mikroskop altında görülebilen *kromozomlara* dönüşür. Örneğin her insan hücresinde 23 çift halinde 46 kromozom bulunur, ama gametlerde bunun yarısı yani 23 kromozom vardır.

Cinsel ilişkinin ökaryotlar için neden evrimsel avantaj sağladığına dönük pek çok fikir bulunuyor. İhtimallerden biri, her iki ebeveynden gelen genlerin *rekombinasyon* denen süreçte karıştırılıp eşleştirilmesiyle ilgili. Eğer iki farklı bireyde yararlı mutasyonlar olursa, aseksüel organizmalarda ikisinin karışması sağlanamaz, oysa eşeyli üreyen organizmalar bunları bir araya getirip fayda sağlayabilirler. Benzer şekilde, cinsel ilişki aynı zamanda bazı bireylerde mutasyonsuz genleri bir araya getirerek kötü, mutasyonlu genleri eleyebilirken, kendini çoğaltan organizmalar kötü genlerden kurtulamaz ve bunlar yüzünden gelecek nesiller ölebilir.

Bu üç alan dışında kalan virüsler, canlılarla cansızlar arasında gri bir bölgeyi temsil eder. Denizde veya toprakta virüslerin sayısı genelde mikroplarının on katıdır. Proteinle veya bazı durumlarda bir de zarla çevrili DNA ve RNA parçaları içerirler. Virüsler oldukça küçüktür, 50-450 nanometrelik (metrenin milyarda biri) boyutları morötesi ışığın dalga boyuyla kıyaslanabilir. Genellikle cansız olarak kabul edilirler çünkü hücre dışında hareketsizdirler ve üreyebilmek için hücreleri enfekte edip ele geçirmeleri gerekir. Bazıları bunu konak hücreye hiç fark ettirmeden gerçekleştirir, yani tüm virüsler hastalık yapıcı değildir. Ökaryot çekirdeğinin kökenini açıklayan teorilerden biri onun büyük bir DNA virüsünden evrimleşmiş olabileceğini öne sürse de, yaşamın evriminde virüslerin rolü hâlâ tartışılıyor.

Yaşamın Kimyası

Yaşamın genetik ve metabolizma gibi pek çok veçhesini tartışabilmek için biyokimyanın kelime hazinesine ihtiyacımız var. Dört ana biyomolekül sınıfı nükleik asitler, karbonhidratlar, proteinler ve lipitlerdir. Pek çok biyomolekül tıpkı evde birleştirilen mobilyalar gibi modülerdir. Monomer adındaki daha küçük parçalardan meydana gelen zincir ya da polimerlerdir.

Karbonhidratlar enerji ve yapı sağlarlar. C, H ve O atomlarını 1:2:1 oranında içerirler ve $C(H_2O)$ biriminin tekrarlarından oluşurlar, yani kimyasal bileşimleri “hidratlı karbon”dur. Beş karbon atomu içeren şekerler DNA ve RNA moleküllerinde bulunurken, altı karbonlu şekerler bitkilerdeki selüloz gibi hücre duvarlarında bulunur.

Lipitler suda çözünmeyen ama kutupsuz yani atomlarının hiçbirinde kayda değer bir elektrik yükü olmayan (zeytinyağı gibi) organik çözücülerde çözünen organik moleküllerdir. Dolayısıyla eğer ölü bir hayvanı kutupsuz bir çözücünün içine koyarsak, çözünen her şey lipit demektir. Yaşam, lipitleri hücre zarlarında, enerji depolamak için yağ olarak ve sinyal molekülü olarak kullanır. Zarların esas bileşenleri fosfolipitlerdir, bu moleküller fosfor içeren hidrofilik (suyu seven) bir uca ve (karbon ve hidrojen atomları içeren) hidrokarbondan oluşan hidrofobik (sudan kaçan) bir kuyruğa sahiptirler. Fosfolipitler iki katman halinde bir araya gelerek zarı oluştururlar. Hidrofilik uçlar hücrenin içindeki ve dışındaki sulu ortama uzanırken, hidrofobik kuyruklar zarın ortasında karşı karşıya gelirler.

Proteinler amino asit birimlerinden oluşan polimerlerdir. Enzimlerde ve yapısal moleküllerde kullanılmanın yanı sıra başka birçok işlevleri vardır.

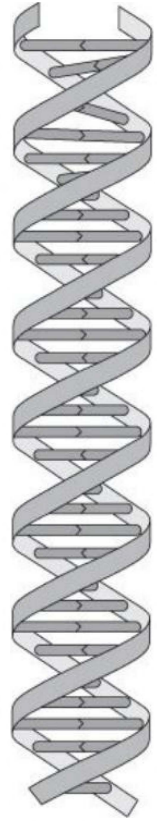
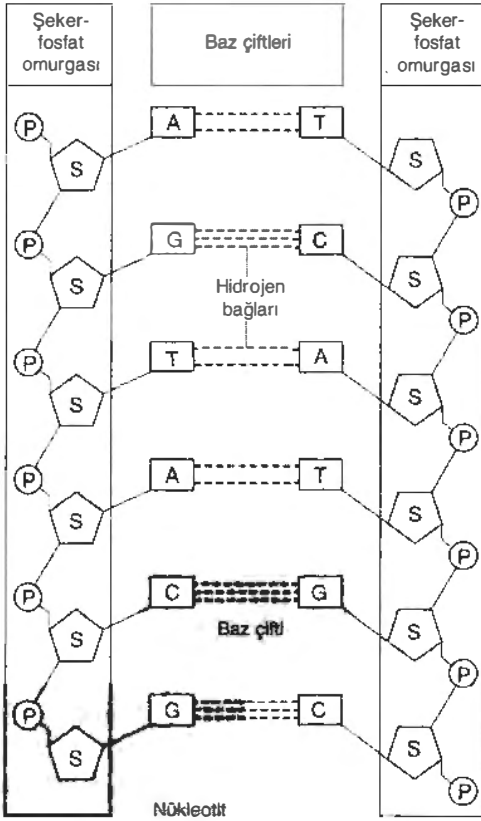
RNA ve DNA nükleik asitlerdir, bu polimerler *nükleotit* monomerlerinden oluşur. Her bir nükleotit beş karbonlu bir şeker, bir

fosfat ve bir bazdan oluşur (Şekil 5). DNA'da dört farklı baz vardır. Hepsi altı atom içeren bir veya iki halkalı yapılardır, bu altı atomun dördü karbon ikisi de azottur. Her bazın bir harf simgesi vardır: A, C, G, T. Bunlar sırasıyla adenin, sitozin, guanin ve timin moleküllerinin kısaltmasıdır. RNA molekülleri de bu bazların üçünü aynen kullanırken DNA'daki T yerine U ile belirtilen urasili içerir.

1953'te James Watson ve Francis Crick DNA'nın yapısını açığa çıkardı: vidaya benzer bir sarmal şeklinde kıvrılan iki polinükleotit zinciri (Şekil 5). Her bir zincirin yanındaki bazlar "hidrojen bağlarıyla" bir arada kalır. Bir hidrojen bağında bir bazın hafifçe pozitif yüklü hidrojeni, karşı zincirdeki hafifçe negatif yüklü atoma doğru çekilir. Yapısal uyumluluk bir C bazının yalnızca bir G bazıyla, bir A bazının yalnızca bir T bazıyla eşleşmesine izin verir. Her bir DNA molekülünde milyonlarca nükleotit bulunur ve hücredeki her kromozom bir DNA ikili sarmalı içerir. RNA molekülleriye tek zincirlidir. Fakat zincirin farklı kısımlarında eşlenik bazlar varsa eğer RNA kendi üzerine katlanabilir (RNA'da adenin bazı urasil ile eşleşir).

DNA'nın yapısı, yaşamın 1. Bölüm'de bahsettiğimiz iki temel özelliğini içinde barındırır: kendini çoğaltma becerisi; gelişme ve devamlılık için bir şablon. Eşlenme (replikasyon) sırasında, DNA sarmalı iki zincire ayrılır ve her ikisi de yeni eşlenik zincir için bir kalıp sağlar. Örneğin kalıpta nerede bir A varsa yeni oluşan zincire bir T eklenir (ve tam tersi). Aynı şey G-C çifti için de geçerlidir. Bu süreçte gerçekleşen mutasyonlar ve hatalar evrime fırsat tanır.

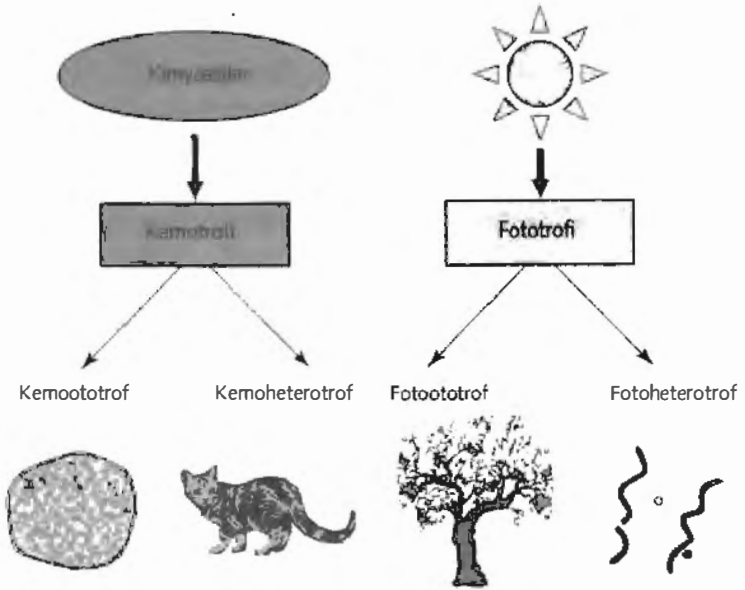
DNA ikili sarmalı şablon görevini yerine getirirken, bir enzim tarafından fermuar gibi açılır ve protein üretimi için talimatlar verir. Açılan DNA'nın bir kısmı *transkripsiyon* (yazılım) aracılığıyla bir mesajcı RNA (mRNA) oluşturur; bu, DNA'nın eşlenik bir kopyasıdır. Bu eşlenik kopyanın tek farkı, DNA'da nerede A varsa karşısına (T yerine) U eklenmiş olmasıdır. Daha sonra, mRNA tıp-



Şekil 5. Sol: DNA birbirine bağlı iki zincirden oluşur. Her bir zincir fosfat (P) ve şeker (S) bileşenlerinden oluşan bir omurgaya sahiptir. İplikler birbirlerine baz çiftleriyle bağlanır. Sağ: Üç boyutta her bir zincir sarmal biçimindedir, şeklin bütünü "ikili sarmal" olarak adlandırılır.

kı bir kurdele gibi ribozomun içine girer. mRNA boyunca, üç harften oluşan *kodon* adlı gruplar *genetik şifreyi* oluşturur ve ribozomdan çıkan proteinde hangi amino asidin bulunacağını belirtirler.

Yaşamın kendini sürdürebilmesi için üremenin yanı sıra metabolizma da gereklidir. Metabolizma enerji elde etmek için mole-



Şekil 6. Karasal yaşam metabolizmalarının sınıflandırılma şeması

küllerin parçalanmasını (*katabolizma*) ve biyomoleküllerin inşasını (*anabolizma*) içerir. Metabolizmaların sınıflandırılması enerji ve karbon ihtiyacına göre gerçekleştirilir. Her bir gereksinim iki farklı yolla karşılanabileceğinden organizmalar için $2 \times 2 = 4$ metabolik terim vardır: *kemoheterotrof*, *kemoototrof*, *fotoheterotrof*, *fotoototrof* (Şekil 6).

Tüm organizmalar bu kategorilerden birine veya birden fazlasına aittir. Bu terimlerdeki *trof* soneki “beslemek” anlamına gelir; organizmaların enerji elde etme yöntemlerinin kimyasal kaynaklar veya güneş ışığı olması ise *kemo-* veya *foto-* öneklerini almalarına neden olur. Bunlara eklenen *hetero-* veya *oto-* önekleriyle karbon edinme yöntemine işaret etmek için kullanılır. Eğer karbon organik karbon tüketiminden geliyorsa *hetero-* öneki uygulanır. Organizma inorganik karbonu organik karbona dönüştürüyorsa

sa *oto-* öneki kullanılır. Genel olarak heterotroflar enerji üretebilmek için besine ihtiyaç duyarken, ototroflar inorganik karbonu organik bileşiklere dönüştürerek kendi enerjilerini üretirler.

Biz insanlar kemoheterotrofuz. Siz ve ben, bitkiler gibi diğer organizmalar tarafından üretilen organik kimyasalları tüketiriz. Tüm hayvan ve mantarlar, pek çok protista ve bilinen mikropların çoğu kemoheterotroftur. Buna karşılık, kemoototrof bir mikrop enerji elde etmek için hidrojen, hidrojen sülfür, demir ve amonyak gibi inorganik kimyasalları kullanır; bunlardan bir kısmı aracılığıyla karbondioksitten karbon elde eder. Kemoototrof mikroplar derin denizlerdeki hidrotermal bacalarda yaşayıp hidrojen sülfürü ve diğer maddeleri oksitler (kemoototroflar *kemolitotrof* olarak da adlandırılır, zira *lithos* Yunancada “taş” anlamına gelir ve bu mikropların kullandığı kimyasallar da jeolojik kaynaklıdır). Bitkiler, algler ve bazı siyanobakteriler fotoototroftur çünkü enerjiyi güneş ışığından, karbonu da havadan elde ederler. Sıcak su kaynaklarında görülen, *Chloroflexus* cinsine ait, fotosentez yapan bakteriler fotoheterotrof mikroplara bir örnektir; bunlar enerji kaynağı olarak güneş ışığını kullanır ve diğer mikroplar tarafından üretilmiş organik bileşenlerden karbon elde ederler. Mars veya Europa’nın yüzey altında kemoototrofların yaşıyor olması mümkündür; yaşama elverişli ötegezegenlerin okyanuslarında da fotoototroflar yaşıyor olabilir.

Yaşam Ağacı (veya Ağı)

Yeryüzündeki yaşamın tarihi, evrimin genleri nasıl değiştirdiğine bakılarak çıkarsanabilir. Evrim bir popülasyonda nesilden nesle aktarılan özelliklerdeki değişimdir. Bireyler genetik çeşitliliğe sahip olduğu için, belirli ortamlarda bazıları koşullara daha iyi adapte olup diğerlerinden daha başarılı biçimde üreyecektir. Biyologlar bu organizmaların *uyum başarısının* (*fitness*) daha yük-

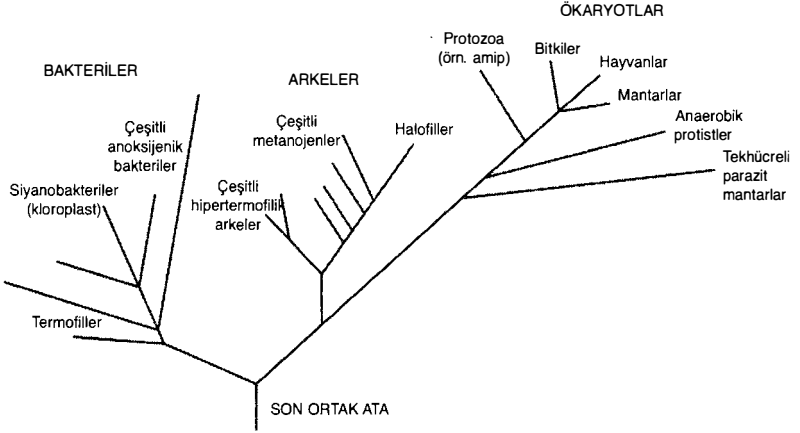
sek olduğunu söyler. Her nesilde uyum başarısı düşük olan bireyler yok olur. Bu, doğal seçilimdir. Pek çok nesil boyunca, soylar çeşitli genetik adaptasyonları biriktirir ve yeni türler evrimleşir.

Eşeyli üreyen organizmalarda, *türler* normal koşullarda sadece kendi içlerinde üreyebilen, başka türden bir canlıyla üreme gerçekleştiremeyen gruplardır, insanlar ve atlar gibi. Birçok bakteri ve arke farklı grupları tanımlayan ekolojik nişlerde yaşar, ama genlerin mikroptan mikroba kolayca geçebiliyor olması mikroorganizma türlerinin belirlenmesini epey zorlaştırır. Bu yüzden böyle durumlarda genetik bilimine başvurulur. Ribozomlarda bulunan RNA'yı kodlayan genlerdeki yüzde 2-3'lük bir fark mikrobiyal türleri birbirinden ayırmak için yeterlidir.

Aslına bakılırsa, genleri karşılaştırarak tüm yaşam formlarının akrabalıklarını belirleyebiliriz. Örneğin genler bize ayak parmakları arasında oluşan mantar ile insanın –her ikisi de ökaryottur– arkelerle bakterilerden çok daha yakın akraba olduğunu gösteriyor, dışarıdan pek öyle görünmese de. 1960'lardan bugüne organizmaları moleküler seviyede değerlendirmek için çeşitli yöntemler geliştirildi, bunlardan biri de proteinlerdeki amino asit veya RNA ve DNA'daki nükleotit dizilerinin karşılaştırılmasıdır.

Genler bir proteindeki amino asitlerin dizilişini belirler, bu yüzden de türlerin “protein dizilerindeki” farklılıklar akrabalığı ya da uzaklığı gösterir. Örneğin “sitokrom c” pek çok organizmada bulunan 104 amino asitli bir proteindir. İnsanlarla şempanzelerde bu dizilimlerin tamamen aynı olması yakın akrabalığa işaret eder. İnsan proteiniyle karşılaştırıldığında rhesus maymunlarının bir amino asidi, köpeklerin ise on üç amino asidi farklıdır vs. Türler birbirinden uzaklaştıkça protein dizileri farklılaşır. Böyle bir veriyle, bir analizci bütün türlerin akrabalığını gösteren, aile ağacına benzeyen bir ağaç çizebilir.

Amerikalı mikrobiyolog Carl Woese (1928-2012), 1970'lerde organizmalar arasındaki ilişkileri belirlemek için proteinler yerine nükleik asitleri kullandı. Woese ribozomlardaki RNA'ları (kısaca



Şekil 7. Ribozomal DNA ile oluşturulmuş “yaşam ağacı”

rRNA) inceledi çünkü bu analizin bütün yaşamın analizini mümkün kıldığı görüşündeydi. Ribozomların görevi olan protein sentezi tüm hücrelerin esas işlevidir. Bu yüzden de, rRNA’yı kodlayan genler zaman içinde yavaş yavaş mutasyon geçirmiş olmalıydı çünkü bu süreçteki mutasyonların çoğu hücre için ölümcül olduğundan aktarılıp birikemezdi. Ribozomların kuru ağırlığının yaklaşık yüzde 60’ı rRNA geri kalanıysa proteindir. Prokaryotlardaki ribozomlar ökaryotlardakilerden küçük olsa da yapı ve işlev bakımından benzerdir, bu da karşılaştırma yapmaya imkân tanır.

Woese küçük rRNA’ları izole edip nükleotit dizilerindeki farkları karşılaştırarak bir “yaşam ağacı” oluşturdu (Şekil 7). Organizmaların evrimsel tarihinin bu şekilde oluşturulmasına *filogeni* adı verilir. Woese’nin ağacı şaşkınlık yaratmıştı çünkü yaşam daha önce bahsettiğimiz üç gruba ayrılmıştı; arkelerin bakterilerle beraber ele alındığı “beş âlem” paradigmasından oldukça farklıydı bu. Dahası, Woese’nin ağacında bitkiler, hayvanlar ve mantarlar ökaryot dalının ucundaki ince sürgünlerdi sadece.

Günümüzde Woese'nin üç üst âlem yaklaşımı yaygın bir kabul görmekle birlikte, diğer genlere yönelik araştırmalar bir nesilden diğerine dikey bir türeyişe işaret eden bir ağacın fazlasıyla basit olduğunu gösteriyor. Bunun sebebi mikroplar arasındaki gen aktarımının (Şekil 4), kimi zaman akraba olmayan türler arasında pek de seçici olmayan biçimde gerçekleşmesidir (*yatay gen aktarımı*). Yani yaşam ağacının mikrobiyal dalları yatay gen transferiyle örülmüş bir "yaşam ağı"na daha çok benzer.

1990'lı yılların ortalarından bu yana DNA dizileme işlemi git-tikçe daha otomatize hale geldi. Çevre numunelerinden tek bir gen dizileme süreci şu şekilde işler: Hücrelerden DNA izole et → "Polimeraz zincir reaksiyonu" adı verilen işlemi gerçekleştirerek bir DNA genini kopyala (ya da çoğalt) → gen dizisini elde et → diğer organizmalarla karşılaştıır → filojeni ağacı oluştur. Zamanla genomların tamamı dizilenmeye başladı ve yaklaşık 21.000 protein kodlayan gen içeren insan genomu da dizilendi.

İnsanda protein kodlayan genlerin 3 milyar nükleotidin yalnızca yüzde 1,5'ini teşkil ediyor olması hayret vericidir. Dizinin geri kalanına "kodlama yapmayan DNA" veya "çöp DNA" denir. Bu terimler aslında yanıltıcıdır çünkü kodlama yapmayan DNA'nın birçok kısmı belirli genler ifade edilirken (protein oluştururken) regülasyon görevi yapar veya rRNA gibi protein olmayan ürünleri kodlar.

Arkeler ile bakteriler arasındaki (genlerin açığa çıkardığı) şaşırtıcı ayrım biyokimyasal farklılıklarla da doğrulanmıştır. Örneğin bakteriyel hücre duvarında karbonhidratların proteinlerle iç içe geçtiği peptidoglikanlar bulunurken, arke hücrelerinde protein, karbonhidrat veya her ikisinin de görüldüğü değişken bir kimya bulunur. Buna karşılık ökaryot hücre duvarları bitkilerde selülozdan ve mantarlarda kitinden oluşur, yalnızca hücre zarına sahip hayvan hücrelerindeyse bu yapı hiç görülmez. Dahası, bakteri ve arkelerin hücre zarı lipitleri de birbirinden farklıdır. Birincisi, fosfolipitlerin hidrofobik ve hidrofilik uçları arasındaki kimyasal

bağlar benzer değildir. İkincisi, hidrofobik uçların zarın ortasında karşılıklı konumlandığı çift katmanlı lipit yapısının yerine, arkelelerde moleküller tamamen birbirlerine bağlıdır. Bunun getirdiği dayanıklılık, bazı arkelerin çok sıcak sularda termofil olarak nasıl yaşayabildiklerini açıklayan etkenlerden biridir. Bir de ekolojik ayrımlar vardır. Örneğin hiçbir arke patojen değildir, yani çeşitli bakterilerden hastalık kapabiliyorken bir arkeden asla hastalık kapmazsınız.

Filojeninin kullanım alanlarından bir diğeri de, taksonlar arasındaki genetik farklılıkların ortaya çıkış zamanının jeolojik tarih içinde tespit edilebilmesi ve bu sayede bir *moleküler saat* oluşturulabilmesidir. Emile Zuckerkandl ve Nobel ödüllü kimyacı Linus Pauling, 1960’larda fosiller sayesinde aynı atadan türedikleri bilinen taksonların proteinlerini karşılaştırdılar. Amino asit farklılıklarının sayısının geçen zamanla doğru orantılı olduğunu buldular. Buna ilişkin olası bir yorum, çoğu değişimin hayatta kalma becerisi üzerinde hiçbir etkisi olmayan “nötr mutasyonlar” olduğudur. Benzer şekilde, belirli DNA dizilerindeki nükleoit değişimleri de geçen zamanla doğru orantılıdır. Moleküler saatler en başarılı sonuçları, benzer mutasyon hızlarına sahip olan yakın akraba türlerde elde ederler. Uzak akraba türlerin yeni nesil oluşturma süreleri, metabolizma hızları ve mutasyon hızları farklıdır ve bunun dikkate alınması gerekir. Bir moleküler saat kullanılırken, moleküler verilere uygulanan bir bilgisayar algoritmasında, fosil kayıtlarından elde edilen bir kalibrasyon noktası belirli bir atanın tarihini tespit eder. Zamanda ne kadar geriye gidersek o kadar az fosil bulunur, bu yüzden tekniği uygulamak da gittikçe zorlaşır. Yine de moleküler saatler hayvanların son ortak atasının yaklaşık 750-800 Ma önce ortaya çıktığına işaret ediyor, bu ise ilginç bir durum çünkü bu tarih bilinen en eski hayvan fosilinin tarihinden daha eski.

Yatay gen aktarımının işleri karmaşık hale getirmesine rağmen, yaşam ağacı erken dönemlerdeki yaşam hakkında bize bilgi

verir. En uygun büyüme sıcaklığı 80-110°C olan termofiller arke ve bakteri rRNA ağacının köküne yakın bir yerde bulunurlar. Buradan çıkarılabilecek akla yatkın bir sonuç, son ortak atanın hidrotermal bir ortamda yaşamış olduğudur. Köke yakın organizmalar aynı zamanda kemoototroftur, bu da ilkel mikropların enerjilerini muhtemelen inorganik bileşiklerden elde ettiğine işaret eder. Filojeni ağacı karmaşık organizmaların daha geç evrimleştiğini de gösterir, bu da fosil kayıtlarıyla uyumludur. Dolayısıyla, eğer Dünya'nın filojenisi astrobiyoloji için bir rehberse, bu rehber fosil kayıtlarıyla aynı şeye işaret eder: Dünyadışı yaşam, ortaya çıktığı gezegenin tarihinin çoğunda büyük ölçüde mikrobiyal olmalıdır.

Aşırı Ortamlarda Yaşam

Son ortak ataya yakın konumlanmalarının yanı sıra, termofiller ekstremofil araştırmaları için de başlangıç noktasıydı. Ekstremofiller insan perspektifinden bakınca aşırı görünen çevresel koşullarda yaşayan organizmalardır. Amerikalı mikrobiyolog Thomas Brock, 1965'te Yellowstone Ulusal Parkı'ndaki sıcak su kaynağında 82-88°C sıcaklıkta yaşayan pembe bakteri filamentleri keşfetti. O zamanlar bir canlının 73°C'den yüksek bir sıcaklıkta yaşayabileceği bilinmiyordu, bu yüzden Brock'un keşfi yaşamın sınırlarının keşfedilmesine dönük bir ilgi yarattı.

Beklenmedik bir şekilde, Brock'un çabaları nihayetinde genetikte büyük gelişmelere de yol açtı. Brock bir başka sıcak su kaynağında *Thermus aquaticus* adında yeni bir bakteri buldu. Endüstriyel sektörde çalışan biliminsanları, bu mikroptan yüksek sıcaklıklarda yapısı bozulmadan kalabilen bir enzimi izole ettiler, bu enzim polimeraz zincir reaksiyonunu (PCR) katalize edebiliyordu. Bu DNA kopyalama tekniği biyolojide çığır açtı. Böylece saf bilim –şu anki terminolojiyle astrobiyoloji– topluma beklenmedik bir fayda sağlamış oldu. PCR teknolojisi günümüzde multimilyar

Kutu 1: Ekstremofiller

Asidofiller: Büyüeyebilmek için pH değeri 3 ve altında olan bir asidik ortama ihtiyaç duyarlar; bazıları 0'ın altındaki pH'ta yaşayabilir.

Alkalifiller: Optimum büyümeye ulaşmak için pH değeri 9'un üstünde bazik bir ortama ihtiyaç duyarlar, bazıları 12 pH'ta yaşayabilir.

Barofiller (veya *piezofiller*): Yüksek basınç onlar için en uygun ortamdır; bazıları Dünya'nın atmosferik basıncının 1000 katından fazla basınçta yaşayabilir.

Endolitler: Bir kayada bulunan porların içinde yaşarlar (*endo*: içinde, *lithos*: taş).

Halofiller: Tuzlu bir ortama ihtiyaç duyarlar, en azından deniz suyunun üçte biri kadar tuzlu bir ortam gereklidir (*halo*: tuz).

Hipolitler: Kayaların altında yaşarlar (*hipo*: altında).

Psikrofiller: En uygun büyüme sıcaklıkları 15°C'nin altıdır. Bazıları -15°C'nin altında da büyüeyebilir, hatta -35°C'de metabolizma aktivitesi bildirilmiştir.

Radyodirençli mikroplar: Radyoaktif madde kaynaklı iyonize edici radyasyona dayanıklıdır.

Termofiller: 60 ila 80°C'de çoğalırlar, bir *hipertermofilin* optimal büyüme sıcaklığıysa 80°C'nin üstündedir. Öte yandan insanlar *mezofil*dir ve yaşam aralıkları 15 ila 50°C'dir.

Xerofiller: Büyümek için çok az miktarda suya ihtiyaç duyarlar, *halofil* veya *endolit* olabilirler (*xeros*: kuru).

dolarlık bir endüstri. Bakterisini kamuoyuna sunan Brock ise bu işten tek bir kuruş bile kazanmadı.

Ekstremofillerin büyümesi (yani üremesi) için genellikle ya aşırı koşullar gereklidir ya da bu koşullarda üreme en uygun seviyededir. Sıcaklık üst limiti, ökaryotlarda 62°C, bakterilerde 95°C ve arkelerde 122°C'dir. Rekorun sahibi olan metan üreten

(metanojen) arke *Methanopyrus kandleri* için en uygun büyüme sıcaklığı 98°C'dir.

Çeşitli ekstremofillerin belirlenmesi (Kutu 1), yaşamın elli yıl önce düşünüldenden çok daha geniş bir çevrede var olabildiğini gösteriyor, bu da Dünya'nın ötesinde yaşam olma ihtimalini artırıyor. Örneğin termofiller Mars'ın yeraltı derinliklerinde hayatta kalabilirler çünkü Dünya'nın kabuğunun derinliklerinde de yaşayabiliyorlar. Yaşamı ilgilendiren bir diğer örnek de, Doğu Antarktika'da 4 kilometrelik buzun altında bulunan (250 km uzunluğunda, 50 km genişliğinde ve 1,2 km derinliğindeki) Vostok Gölü'dür. Gölün 100 metre üzerindeki buzun göldeki suyun donmasıyla oluştuğu düşünülüyor. Gariptir ki, orada kemoototrof termofillerin DNA kalıntıları bulundu. Bu da soğuk gölün altında (basınçtan dolayı -2°C), çatlaklardan çıkan ve içinde termofiller bulunan hidrotermal su olabileceğine işaret ediyor. Vostok gibi göllerde yaşamın tespit edilebilmesi için geliştirilen yöntemler, Güneş Sistemi'nin diğer kısımlarındaki yaşam arayışında da uygulanabilir. Jüpiter'in uydusu Europa'nın yüzeyaltı okyanusundan yaşam arayışı için numune toplamak da benzer zorluklara gebedir.

6

Güneş Sistemi'nde Yaşam

Bugün Hangi Dünyalar Yaşama Elverişli Olabilir?

2002 yılında astrobiyoloji dersi verirken, Plüton'un yörüngesine kadar olan bölgede dünyadışı yaşam barındırabileceğini düşündüğüm dokuz gök cismini tahmin eden her öğrenciye ödül vermeyi vaat ettim (Tablo 1). Hiç kimse ödülü kazanamadı. Fakat astrobiyolojinin gelişmesi ve internetteki bilgi miktarının artışıyla beraber, 2010'da bir öğrenci bu ödülü kazandı. Artık bu dokuz cisme birkaç tane daha ekleyebilirim, ama onları bölümün sonuna bırakıyorum.

Tablo 1'de basit, mikroplarla karşılaştırılabilir bir yaşam biçimini inceliyorum, yol gösterici ilkeyse sıvı suyun varlığı. Yeryüzünde nerede sıvı su bulursak orada yaşam vardır, bu ister fokurdayan sıcak su kaynakları, ister buz içindeki tuzlu su damlaları, isterse yerkabuğunun derinlerindeki minerallerin çevresindeki su filmleri olsun.

Bazıları daha da ileri gidip Satürn'ün en büyük uydusu Titan'ın göllerinde *tuhaf yaşamın* –suya ihtiyaç duymayan organizmaların– var olabileceğini öne sürüyor. Titan'ın göllerinde su değil sıvı hidrokarbonlar bulunur, küçük petrol denizlerine benzerler. Çözücü olarak hidrokarbonları kullanan bir yaşam biçimi bilinmiyor ve böyle bir yaşamın zor olabileceğine dair fiziksel kimya

Tablo 1. Güneş Sistemi'nde yaşamın görülebileceği dokuz gök cismi. Güneş'e olan uzaklık Astronomik Birim (AU) cinsindendir. 1 AU Dünya'nın Güneş'e uzaklığına eşittir ve yaklaşık 150 milyon km veya 93 milyon mildir.

Cisim	Cisim tipi ve Güneş'ten ortalama uzaklığı	Neden Yaşama Sahip Olabileceği
Mars	Gezegen, 1,5 AU	Yüzeyaltı sıvı su cepleri bulunabilir
Ceres	En büyük asteroit, 2,8 AU	Yüzeyaltı okyanusu bulunabilir
Europa, Ganymede, Callisto	Jüpiter'in büyük, buzlu uyduları, 5,2 AU	Yüzeyaltı okyanusunun varlığına dair kanıtlar
Enceladus	Satürn'ün buzlu uydusu, 9,6 AU	Yüzeyaltı okyanusunun veya denizinin varlığına dair kanıtlar ve organik madde varlığı
Titan	Satürn'ün en büyük uydusu, 9,6 AU	Yüzeyaltı okyanusunun varlığına dair kanıtlar ve organik madde varlığı
Triton	Neptün'ün en büyük uydusu, 30,1 AU	Yüzeyaltı okyanusu bulunabilir
Plüton	Büyük Kuiper Kuşağı Cismi, 39,3 AU	Yüzeyaltı okyanusu bulunabilir

kaynaklı bazı argümanlar var (onlara daha sonra geleceğim). Öte yandan, sıvı suyun yaşam için uygun bir ortam sağlayacağından kimsenin şüphesi yok.

Güneş Işığı ve İç Gezegenlerin Yaşanabilirliği

Merkür, Venüs, Dünya veya Mars gibi iç gezegenlerde sıvı suyun bulunup bulunmaması büyük çoğunlukla sıcaklıkla ilgilidir, yani Güneş'ten uzaklığa bağlıdır (Tablo 2). “Çok iyi bir konum” yalnızca ev satarken işe yaramakla kalmaz, gezegenlerin yaşanabilirliği için de büyük önem taşır.

Tablo 2. İç gezegenler ve şu andaki yaşanabilirliklerini etkileyen faktörler

	Merkür	Venüs	Dünya	Mars
Güneş'e ortalama uzaklık (Astronomik Birim, AU)	0,4	0,72	1	1,5
Ortalama yüzey sıcaklığı (°C)	167	462	15	-56
Sera etkisi (°C)	0	507	33	7
Atmosfer basıncı	0	93	1	0,006
Sıvı su?	Fazla sıcak	Fazla sıcak	Bol miktarda	Genellikle fazla soğuk
Atmosferdeki ana gazlar	Havasız	%96,5 karbondioksit, %3,5 azot	%78 azot, %21 oksijen	%95,3 karbondioksit, %2,7 azot

Konum önemlidir çünkü güneş ışığı, gezegen-Güneş mesafesinin karesine paralel olarak yüzey alanı artan bir küre şeklinde yayılır. *Güneş akısı* metrekaire başına düşen güneş ışığının Watt değeridir (tıpkı ampullerdeki gibi). Dünya'nın yörünge mesafesi olan 1 Astronomik Birim'de (AU) güneş ışığı metrekaire başına 1336 Watt sağlar, bu da neredeyse 100 Watt'lık on dört ampule eşdeğerdir. Jüpiter'in 5 AU'luk yörünge mesafesindeyse güneş akısı Dünya'dakinin $1/25$ 'i kadardır çünkü aynı enerji $5 \times 5 = 25$ kat alana sahip bir küreye yayılır. 1,5 AU'daki Mars için güneş akısı Dünya'ninkinden 2,25 kat azdır ($= 1,5 \times 1,5$). 0,72 AU'daki Venüs ise Dünya'nın neredeyse iki katı güneş akısına maruz kalır.

Güneş'ten yalnızca 0,4 AU uzaklıktaki Merkür'de yaşam yoktur. Sekiz gezegenin en küçüğü olan Merkür'de sıvı yoktur ve muhtemelen hiç olmamıştır. Günümüzde Merkür'ün çorak yüzeyi bazen 430°C 'ye ulaşır. Merkür'ün bir zamanlar atmosferi vardiysa bile, gezegen oluşurken düşük kütleçekimi ve çok yoğun güneş ışığı yüzünden yanıp tükenmiş olmalı.

Venüs ve Mars'ın Güneş'e olan uzaklıkları bu gezegenlerin neden yaşam için uygun olmadıklarını ortaya koysa da, hikâyenin tümünü açıklamaya yetmez. Venüs'ün yaklaşık 460°C 'lik yüzeyi

Merkür'ün bile ulaşamayacağı bir sıcaklıktayken, Mars ortalama -56°C 'lik buzlu bir çöldür. Venüs'ün büyüklüğü Dünya'ninkine yakındır ama Mars daha küçüktür – çapı Dünya'ninkinin yarısıyken, kütlesiyse Dünya'ninkinin dokuzda biridir. Aslına bakılırsa, daha sonra da göreceğimiz gibi, Mars'ın küçük boyutu günümüzde yaşanabilir olmamasının nedenidir.

Güneş akısının yanı sıra, Mars ve Venüs'teki sera etkisi de yüzey sıcaklıklarına etki eder. Mars atmosferi yalnızca 0,006 bar yüzey basıncı uygular; oysa bu rakam Dünya'da 1 bara eşittir. Bu seyrek hava yüzde 95,3 karbondioksit, yüzde 2,7 azot ve az miktardaki diğer gazların karışımından oluşur. Dünya'nın sera etkisi 33°C 'dir. Atmosferin inceliği ve kuruluşu yüzünden Mars'ın sera etkisi ise yalnızca 7°C 'dir, gezegen de bu yüzden donmuş halde-dir. Venüs'ün atmosferindeki iki ana gaz, yüzde 96,5 oranda karbondioksit ve yüzde 3,5 oranda azottur. Bu oranlar Mars'inkine benzer, ama aralarında büyük bir fark vardır: Venüs atmosferi çok kalındır ve ortalama rakımda 93 barlık yüksek bir basınca sahiptir. Bunun sonucunda, Venüs'ün sera etkisi 507°C gibi yüksek bir seviyededir, yani Mars'inkinden 500°C fazladır (Tablo 2). Buradan çıkan sonuç her iki gezegenin de sıvı su bulunduramayacağıdır. Mars'ın seyrek havasında bir su birikintisi aynı anda hem kaynar (hızlıca buharlaşır) hem de donar ve su genellikle yalnızca buz veya buhar şeklinde bulunur. Venüs'ün yakıcı yüzeyindeyse sıvı suyun bulunması mümkün değildir.

Çoğu astrobiyolog sıvı su bulundurmayan Venüs'te yaşam olmadığını düşünüyor. Bazılarıysa asidofil mikropların sülfürik asit parçacıklarından oluşan bulutlarda yaşayabileceğini öne sürüyor. Bu konuda şüpheliyim. Suyun yokluğuna ek olarak, atmosferik türbülans da mikropları aşağıya, Venüs'ün cehennemine veya yu-karıya, ölümcül yüksekliklere çekecektir.

Geçmişte Venüs'te Yaşam Ortaya Çıkmış Olabilir mi?

Venüs astrobiyolojik açıdan hâlâ ilginçtir çünkü gezegen bir zamanlar okyanuslara ve yaşama ev sahipliği yapmış olabilir. İlk başlarda Venüs'te bolca su bulunmuş olmalı çünkü diğer uçucuların miktarları Dünya'dakine benziyor. (Uçucular bir gezegende ki olağan sıcaklıklarda gaz haline gelen maddelerdir.) Örneğin Dünya'daki tüm karbonat kayaçlarını alıp karbondioksite dönüştürürseniz, Dünya tıpkı Venüs'te olduğu gibi, yaklaşık doksan atmosfere yetecek kadar karbondioksite sahip olur. Dünya mineralindeki tüm azotları açığa çıkarıp Dünya'nın atmosferine katarırsanız, yaklaşık üç atmosfere yetecek kadar azot gazına sahip olursunuz ki bu da Venüs'ün atmosferine benzer. Venüs'ün ve Dünya'nın nihai karbon ve azot kaynağı hidratlı asteroidler olduğu için, tıpkı Dünya gibi Venüs'ün de onlardan bol bol su edindiği sonucuna varabiliriz.

Ne yazık ki Venüs'ün Güneş'e yakınlığından kaynaklanan kontrolden çıkmış sera etkisi bu gezegenin lanetidir. Şiddetli güneş ışığıyla kavrulup buharlaşan su bir atmosferi o kadar nemli hale getirir ki, atmosfer gezegenin yüzeyinden yayılan kızılötesi radyasyonun geçmesine izin vermeyecek kadar opaklaşabilir. Bu noktada, uzaya yayılan kızılötesi radyasyonun gezegeni soğutma kapasitesinin bir sınırı vardır; bu sınır suyun özelliklerine ve gezegenin kütleçekimine bağlıdır. Yakın zamanda yapılan hesaplamalar bu *kontrolden çıkma sınırının* Dünya için metrekaşe başına 282 Watt, Venüs içinse bundan birkaç Watt daha az olduğuna işaret ediyor.

Kontrolden çıkma sınırını anlayabilmek için, Dünya'yı Venüs'e dönüştürdüğümüzü düşünün. Daha önce bahsettiğimiz gibi, Dünya yörüngesinde güneş akısı metrekaşe başına 1336 Watt olsa da, Dünya bunun yüzde 30'unu yansıtıp yalnızca yüzde 70'ini absorbe eder. Ayrıca Dünya'nın yalnızca yarısının güneş ışığı alması

yüzde 50'lik bir azalışa daha neden olurken, yeryüzünün kavisli yüzeyinin güneş ışınlarından kaçınması da yine yüzde 50'lik bir azalmaya yol açar. Bütün bu faktörler yan yana geldiğinde, Dünya net olarak metrekare başına $(0,7 \times 0,5 \times 0,5) \times 1,366 = 240$ Watt güneş ışığı absorbe eder. Stabil haldeyken Dünya aynı miktardaki kızılötesi enerjiyi uzaya salar, bu sayede de sabit bir küresel ortalama sıcaklığa sahiptir. Ama Dünya'nın Venüs'ün yörüngesine taşındığını hayal edersek, metrekare başına absorbe edilen güneş ışığı 240'tan 480 Watt'a çıkacaktır. Okyanus sıcak bir havuza dönüşecek ve buharlı atmosfer, metrekare başına yalnızca 282 Watt'lık radyasyonun uzaya salınabildiği sınıra erişecektir. Metrekare başına gelen enerji (480 Watt) giden enerjiden (282 Watt) fazla olduğu için Dünya gittikçe daha da sıcak olacaktır. Okyanusun tamamı buharlaşacak ve kayalar eriyecektir. Bu noktada, yanan üst atmosferden uzaya "yakın kızılötesi" ışık saçılacak, böylece gelen güneş ışığı ve giden radyasyon tekrar dengeye gelince yüzey sıcaklığı 1200°C civarında sabitlenecektir. Venüs'ün bu nahoş süreci tecrübe ettiğini düşünüyoruz. Eğer Venüslüler vardıysa, hepsi kızarmış olmalı.

Kontrolden çıkmış sera etkisi, aynı zamanda Venüs'ün okyanusunun yok olmasına da neden olmuş olmalı. Üst atmosferde, morötesi ışık su buharını hidrojen ve oksijene ayırıştıracaktır. Çok hafif olan hidrojen uzaya kaçarken oksijenin bir kısmını da yanında götürür, geride kalan oksijenler de aşağıdaki sıcak kayaları oksitler. Sonunda kayalar katılaşır ama o zamana dek atmosfer sıcak yüzeyden salınan karbondioksit ve azotla dolmuş olacaktır. Sonuç ise günümüzün cehennemvari Venüs'ü olacaktır.

Sera etkisi kontrolden çıkmadan önce, Venüs'ün okyanuslarında yaşam gelişmiş olabilir. Erken Güneş'in daha az parlak olduğunu hatırlayın. Dolayısıyla kontrolden çıkmış sera etkisi görülmeden önce birkaç yüz milyon yıl geçmiş olabilir. Ne yazık ki, yaşam ortaya çıkmış olsa bile bunu kanıtlamak kolay değil. 1990'larda NASA'nın *Magellan* uzay aracının radarı Venüs yüzeyinin

haritasını çıkardı. Eski yüzeylerde daha çok krater bulunur, bu yüzden çarpışma kraterlerinin yoğunluğu kullanılarak hesaplanan yüzey yaşı gayet istikrarlı bir şekilde 600 ila 800 Ma olarak çıktı. Venüs'ün yüzeyi tek seferde lavla kaplanmış gibi görünüyor. Bunun sebeplerinden biri, Dünya'nın içsel ısını sürekli yeni deniz tabanı oluşturarak salmasına karşılık, Venüs'te içsel ısının periyodik olarak artması ve sonunda iç kısımların aşırı ısınarak sıcak lavların her yerden fışkırması olabilir. Venüs bu şekilde davranmış olabilir çünkü Dünya'dan farklı olarak Venüs'te levha hareketlerini kayganlaştıracak su yoktur.

Bu süreç tüm fosilleri yok edecektir. Ama geride göze çarpmayan jeokimyasal izler kalmış olabilir. Venüs'te bir zamanlar yaşam olup olmadığını araştırmanın en iyi yolu, gelecekteki uzay görevlerinde Venüs'ten kaya örnekleri toplayıp Dünya'ya getirmektir.

Sulu Mars: Yaşama Ev Sahipliği Yapabilir mi?

Venüs'ün tersine, Mars pek çokları tarafından yaşam için potansiyel bir yuva olarak hayal edildi. Uzay Çağı'ndan önce Mars'ta bir günün 24,66 saat, bir yılın 1,9 Dünya yılı ve kütleçekiminin Dünya'dakinin yüzde 40'ı kadar olduğu gibi temel parametreler biliniyordu. İlk başarılı uzay görevine kadar yüzey hakkında pek fazla bilimiz yoktu; 1965'te NASA'nın *Mariner 4* uzay aracının Mars'ın yakınından geçişi tıpkı Ay gibi bol kraterli bir yüzeyi ortaya çıkardı. Yaşam umutları sekteye uğramıştı. Daha sonraysa, NASA'nın *Mariner 9* uydusu kurumuş nehir yataklarını ve sönmüş yanardağları fotoğraflayıp Mars'ın bir zamanlar Dünya gibi olmuş olabileceğini gösterdi. Ne var ki hemen sonra sarkaç tekrar diğer tarafa yöneldi: *Viking* görevinde kullanılan birbirinin aynısı ikişer uydu ve yüzey aracı 1976'da Mars'a ulaştı ama yaşam bulmayı başaramadı (buna daha sonra geleceğiz).

1980'lerdeki aranın ardından keşifler yeniden başladı. 1997'

den 2006'ya dek yörüngede kalan *Mars Global Surveyor*, Mars'ın haritasını çıkararak erozyon ve birikme kaynaklı çok sayıda jeolojik döngünün varlığına işaret eden tortul kayaçları görüntüledi. Yirmi birinci yüzyılın başlarında *Mars Odyssey*, *Mars Express* ve *Mars Reconnaissance* uyduları sıvı suyun içinde oluşmuş olma ihtimali bulunan kil mineralleri ve tuzlar içeren bölgeler keşfettiler. İkiz Mars keşif araçları (*Mars Exploration Rovers*) 2004'te gezegene inip geçmişte var olan sıvı sudan kaynaklanan fosilleşmiş dalgalar ve tortul kayaçlar buldular. 2008'deyse NASA'nın *Phoenix Lander*'ı kutup bölgesindeki yüzeyaltı buzlarını kazıp toprakta çözünen tuzları ölçtü. *Curiosity Rover*, Gale adı verilen 150 km çapındaki kraterin içindeki tortul yataklarından oluşmuş 5 kilometrelik dağa tırmandı. Yaşam için gerekli olan altı elementi (karbon, hidrojen, azot, oksijen, fosfor ve sülfür) içeren, sudan artakalan çamurtaşları buldu.

Bugünlerde Mars'a dönük astrobiyolojik ilgi ya milyarlarca yıl öncesinden kalma biyolojik izleri veya yeraltında yaşamını sürdüren mikrobiyal benzeri yaşamı bulmaya yönelik. Uzay Çağı öncesinin Dünya benzeri Mars umutlarının yerinde kum fırtınaları, her gün ortaya çıkan toz hortumları ve yağmursuz iklimiyle soğuk, rüzgârlı, küresel bir çöl gerçekliği var artık.

Mars'ın şimdiki yüzeyinin yaşam için uygun olmamasının üç nedeni var. Birincisi, Mars'ta buz bulunduğundan emin olsak da sıvı su *kesin olarak* tespit edilebilmiş değil. Kutup başlıkları su buzundan ve kış kutbunda atmosferin yaklaşık yüzde 30'unun donmasıyla bu buzun üstünde gelişen karbondioksit "kuru buzundan" oluşur. Orta enlemlerde de yüzeyin altında buzlanmış toprak veya *permafrost* bulunur. Dönencelerde öğle sonrası sıcaklıkları toprak yüzeyinde donma derecesinin üstüne çıksa da buzlar erime derecesine ulaşmadan buharlaşır. İkincisi, ozon tabakasının bulunmayışı zararlı morötesi güneş ışığının yüzeye ulaşmasına izin verir. Üçüncüsü, atmosferdeki kimyasal reaksiyonlar hidrojen peroksit üretir; bu kimyasal saçları "açmak" için kullanılan oksijenli

suyun ta kendisidir. Yüzeye yerleşen hidrojen peroksit molekülleri buradaki organik maddeleri yok edebilir.

Yüzey pek umut vaat etmese de, yeraltındaki jeotermal ısı sıvı suyun ve yaşamın var olmasını mümkün kılabilir. Aslına bakılırsa, atmosferik metanın hacimce milyarda on birim ortalama olduğu belirlenmesi yeraltı patojenlerinin varlığına dönük bir heyecan yarattı. Mars'tan yansıyan güneş ışığını toplayan teleskoplar ve *Mars Express*, atmosferik metan emilimi gerçekleştiğini gösterdiler. Fakat metan sinyalinin zar zor seçilebiliyor olması, benim de aralarında olduğum bazı kuşkucu biliminsanlarının Mars'ta gerçekten metan bulunduğundan şüphe etmesine yol açtı. Daha sonraki girişimlerde de *Curiosity Rover* milyarda bir birim seviyesinde metan bulmayı başaramadı.

Astrobiyologlar Mars'taki geçmiş yaşam hakkında konuşurken Mars'ın jeolojik zaman ölçeğini kullanır; bu ölçek şu devirlerden oluşur: *Nuh Öncesi Devir* (*Pre-Noachian*; 4,1 Ga önce), *Nuh Devri* (*Noachian*; 4,1 Ga öncesinden 3,7 Ga öncesine), *Hesperian Devri* (3,7 Ga öncesinden 3 Ga öncesine) ve *Amazon Devri* (3 Ga öncesinden itibaren). Çarpışma kraterlerine bakılarak Mars yüzeylerinin hangi devre ait oldukları belirlenir. Daha eski yüzeyler daha büyük ve daha çok sayıda krater biriktirir. Aslında her bir devri sınırlayan tarihler Ay kaynaklıdır. *Apollo* uzay mekiğinin astronotları tarafından getirilen kayaların radyoizotoplarla belirlenen yaşları, Ay'daki krater yoğunluklarını zaman ile ilişkilendirir (bunlara belli zamanlar atar). Mars'ta Ay'a kıyasla daha fazla çarpışma yaşandığını gösteren astronomik hesaplamalar, bu bağının Mars'a da uygulanmasına imkân verir.

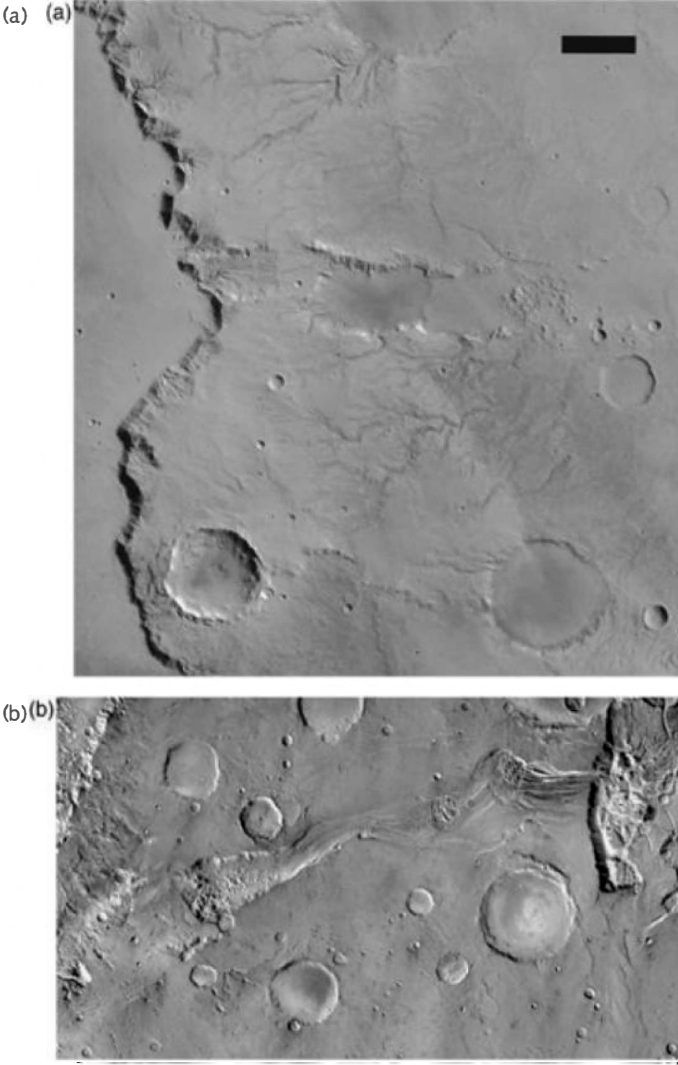
Bir zamanlar Mars'ta sıvı suyun bulunduğuna dair kanıtlar Mars'ın çok eskiden bugünküne kıyasla daha yaşanabilir olduğuna işaret ediyor. Görüntülerde kurumuş nehir vadileri, deltalar ve devasa kanallar gibi *flüvyal* (akıntı kaynaklı) yapılar olduğu görülüyor. Toprakta ve kayalarda da sıvı suyun varlığında oluşan mineraller bulunuyor.

Oluklar (gullies) her iki yarımkürede 30 ile 70° enlemleri arasındaki kraterlerin ve yüksek düzlüklerin duvarlarında bulunan, uzunlukları onlarca metreden yüzlerce metreye kadar değişiklik gösteren yarıklardır. Olukların üstünde kraterlerin bulunmaması ve bazılarının akışkan kum çöllerinin üstünden geçiyor olması onların çok yakın zamanda ortaya çıkmış olduklarını gösteriyor. İlk başlarda bu yapıların buzlar erirken oluştuğu düşünülüyordu. Ama görüntüler olukların karbondioksit buzu buharlaşırken, tahminen toprak ve kayalardan oluşan bir kuru akışı tetikleyerek oluştuklarına işaret ediyor.

Mars'taki *vadi ağları*ysa çok daha eski yapılarıdır; bunlar çatalanıp ağaç benzeri yapılar oluşturmuş olan kurumuş nehir benzeri çöküntülerdir (Şekil 8). Çoğu bol kraterli Nuh bölgesinde (*Noachis Terra*) bulunur; 1-4 km genişliğinde ve 50-300 metre derinliğindedirler. Kolların yoğunluğu yeryüzündeki nehirlerden çok daha az olsa da, bazıları yağmur sularının veya eriyen buzların tahliye edildiğine işaret eder. Diğer durumlarda, üzerlerinde kısa ve kalın kollar olan vadiler muhtemelen, yeraltı sularının (erimiş buzların) erozyona ve üzerlerindeki zeminin çökmesine yol açmasıyla oluşmuştur. Bazı vadilerin sonunda da deltalar bulunur.

Nuh bölgesindeki kraterlerde bozunmuş çeperler ve sığ zeminler görülür. Bu erozyona neyin neden olduğu bilinmiyor. Vadi ağları üst kısımlarda oyulduğu için bundan sorumlu olamaz. 3,7 Ga önce Hesperian başladığında, erozyon hızı dramatik biçimde düştü ve vadi ağları daha nadir görülmeye başladı.

Hesperian'ın sonuna doğru (yaklaşık 3 Ga önce), *taşkın kanalları (outflow channels)* görülmeye başladı. Sıvı akışıyla oluşan bu kanallar, nehir vadilerinden farklı olarak tek kaynaktan çıkıp, dalanıp budaklanmadan, setler arasında kalır. Taşkın kanalları devasadır: 400 km genişliğe, 1000 km uzunluğa ve birkaç kilometre derinliğe erişebilirler. Çoğunun başlangıç noktası zeminin çöktüğü *kaotik topraklar*, bazen de bir dağ büyüklüğünde sülfat tuzu kalıntıları barındıran kanyon ve yarıklardır (bu kalıntılar tuzlu su-



Şekil 8. a) Mars'taki vadi ağları. Sol tarafta 456 km çapındaki Huygens kraterinin erozyona uğramış çeperi görülüyor. Görüntü 14°G, 61°D'da ortalanmıştır (yukarısı kuzey). Ölçek çubuğu = 20 km; b) Ravi Vallis taşkın kanalı (0,5°G, 318°D), yaklaşık 205 km uzunluğundadır.

yun buharlaşmasından artakalanlar olabilir).

Taşkın kanalları konusunda en çok kabul gören açıklama, bunların yeraltı buzlarının erimesi veya akiferlerin fışkırması sonucunda açığa çıkan sel sularıyla oluştuklarıdır. Ne var ki bu yapının yeryüzündeki en meşhur analoguna, yani ABD'nin Washington eyaletinin doğusundaki sel yataklarına (Channelled Scablands) kıyasla 10-100 kat daha fazla akışa ihtiyaç duyarlar. ABD'deki bu coğrafi yapılar son buz devrinin sonunda, büyük bir gölün buzdan tavanının periyodik kırılmaları sonucunda oluşmuştur.

Mars'ın taşkın kanallarını oluşturan suyu açıklamak kolay değil. Bunun için yüzlerce metre derinliğinde küresel bir okyanusa eşit miktarda suyun gerekli olduğu hesaplanıyor; bu da günümüzde buz halinde bulunan sudan çok daha fazla. Kanallar kuzeydeki düzlüklere doğru ilerlediği için bazı biliminsanları geçmişte orada bir okyanusun oluştuğunu öne sürüyor. Buna karşılık, azınlıkta kalan bir grup biliminsanı da taşkın kanallarının su yerine lavlar tarafından oluşturulduğunu düşünüyor. Kimya bize Mars lavlarının akışkan, türbülanslı ve aşındırıcı olması gerektiğini söylüyor.

Kadim vadi ağları ve taşkın kanalları bir yana, Mars'ta eskiden su olduğunun bir diğer kanıtı da minerallerdir. Eski mezar taşlarındaki yazıların suyla gerçekleşen kimyasal tepkimeler yüzünden nasıl yok olduğunu herkes bilir. Bu tepkimelerde, kimyasal ayrışma mineralleri değiştirir veya çözünmelerine neden olur. Mars yüzeyinin büyük çoğunluğu, tıpkı Venüs ve Dünya'nın deniz tabanı gibi, bazalttan oluşur; bu koyu renkli magmatik kayalar demir ve magnezyum silikat mineralleri bakımından zengindir. Bazalt kimyasal ayrışmaya maruz kaldığında, kil gibi *alterasyon mineralleri* üretilir. Dolayısıyla alterasyon minerallerinin varlığı sıvı suyun var olduğu ve bazen de spesifik bir pH değerine sahip olduğu anlamına gelir. Örneğin bazik sular bazalttan kil mineralleri üretme eğilimindedir.

Mars'ın yüzeyinden yansıyan kızılötesi radyasyonun incelenmesi sonucunda, su içeren alterasyon mineralleri tespit edildi. Fa-

kat Nuh bölgesi yüzeylerinin yalnızca yüzde üçü su içeren kil ve karbonatlardan oluşur. Nuh ve Hesperian devirlerinin sonlarından kalma yüzeylerde sülfat mineralleri baskınken, daha genç Amazon yüzeylerinde kırmızımsı, kuru demir oksitler daha yaygındır. Bu örüntü üç çevresel döneme işaret ediyor. İlk dönemde, bazik veya nötr pH'a sahip sular bazaltı ayrıştırarak kil oluşturdu. İkinci dönemde, volkanik sülfür gazlarından gelen sülfürik asit sülfatları oluşturdu. Soğuk, kuru bir ortamın ve pas rengindeki yüzeylerin hâkim olduğu üçüncü dönemse hâlâ devam ediyor.

İkiz *Mars Exploration Rover*'larından biri olan *Opportunity*, Nuh sülfatlarının yakınlarına iniş yaptı. Milimetre ölçeğindeki demir oksit hematit (Fe_2O_3) küreleri, tıpkı üzümlü kekteki üzüm-ler gibi sülfat katmanlarının içine gömülüydü. Hematit 3,7 milyar yıl önce yeraltında dolaşan sularla taşınan minerallerin çökmesi sonucu oluştu. Ayrıca yüzeyde biriken bir karış derinliğindeki sular, tortul tabakada dalga izleri bırakmışa benziyor. *Spirit* adındaki diğer keşif aracı, gezegenin öteki tarafında kadim sıcak su kaynakları olduğuna dair kanıtlar buldu.

Mars'ın Erken Dönem Atmosferi ve İklimi

Mars'ta sıvı suyun bulunduğu dair kanıtlar, gezegenin erken dönem ikliminin ılık ve yağışlı olabileceğini düşündürüyor. Bu konuda anlaşmazlığa düşen biliminsanları iki kutba ayrılıyor. Bir grup, Mars'ın onlarca veya yüzlerce milyon yıl boyunca ılık ve yağışlı bir iklime sahip olduğunu savunuyor. Diğer grup ise bu görülenlerin nedeninin soğuk iklimde buzun geçici olarak erimesi olduğuna inanıyor.

İlk senaryo yaşam için tabii ki daha uygundur. Ama ne yazık ki hiç kimse genç Mars'ın nasıl milyonlarca yıl boyunca sıcak kaldığını açıklayabilmiş değil. 3,7 milyar yıl önce Güneş yüzde 25 daha soluktu. Mars'ı donma seviyesinin hemen üstünde tutabilmek için yaklaşık 80°C'lik bir sera etkisi gerekliydi. Mars oluşur-

ken tüm atmosferik hidrojen hızla uzaya kaçmış olmalı, dolayısıyla gezegenin atmosferi muhtemelen oksitlenmişti, karbondioksit ve azotla doluydu. Mars hiçbir zaman Venüs'üne benzer çok kalın bir atmosfere sahip olmuş olamaz çünkü Mars'ın Güneş'e uzaklığı atmosferdeki karbondioksitin donup buluta dönüşmesine neden olacaktır. Karbondioksitten oluşan kalın bir atmosfer güneş ışığını uzaya geri yansıtıp yüzeyin soğumasına neden olur. Bu da karbondioksitin erken dönemde sıcak bir iklim sağlamayacağı anlamına gelir. Alternatif bir öneri, volkanik sülfür dioksitin ana sera gazı olmasıdır. Ne var ki sülfür dioksit yağmurda çözünür ve Mars yağışlı hale geldiyse bu gazın atmosferden atılmış olması gerekir. Ayrıca yükseklerde gerçekleşen atmosferik tepkimeler de sülfür dioksiti sülfat partikülleri içeren bir süspansiyona dönüştürecektir, bu süspansiyon da güneş ışığını yansıtarak gezegeni soğutacaktır. Filipinler'deki Pinatubo Dağı'nın volkanik emisyonları sonucunda, 1991-93 yılları sırasında biz de buna benzer bir soğumaya tanık olduk.

Diğer gruptaki biliminsanları soğuk iklimde sıvı suyun bulunmasını mümkün kılacak pek çok mekanizma öne sürdüler. Çarpışmaların buzu buhara çevirebileceğini ve bunun da nehir vadilerini erozyona uğratabileceğini ve bunun da nehir vadilerini erozyona uğratabileceğini ve bunun da nehir vadilerini erozyona uğratabileceğini belirtti. Mars'ın eksen eğikliğinin ve yörünge şeklinin geçmişte uygun bir kombinasyonda buluşmasının bölgesel erimelere neden olup erozyona yol açmış olması da mümkündür. Eksen eğikliği ve yörünge şekli gibi özellikler zamanla diğer gezegenlerin kütleçekim etkileri nedeniyle bozulur. Gezegenin eksenin yörüngesine oranla eğimi (örneğin Dünya'nınki $23,5^\circ$ 'dir) mevsimlerin oluşmasını sağlar, çünkü belirli bir anda bir yarımküre diğerinden daha fazla güneş ışığı alır. Dünya'dan farklı olarak Mars'ın eksenini sabitleyecek büyük bir uydusu yoktur (iki küçük uydusu ihmal edilebilir bir etkiye sahiptir), bu yüzden Mars'ın eksen eğikliği geçtiğimiz 4,5 milyar yıl boyunca 0° ile 80° arasında değişmiştir. Yüksek eğikliklerde yazın kutup buzları Güneş'e bakar ve buharlaşır. Ha-

va akımları buharı soğuk dönencelere götürüp kar yağışına dönüştürür. Diğer mevsimlerde veya eğikliğin daha az olduğu dönemlerdeyse güneş ışığı karın erimesine ve akıntı kaynaklı erozyona neden olur. Mars'ın son birkaç milyon yıl boyunca görülen ortalama eğikliği, bir zamanlar buzla kaplı olan orta enlemlerin şu an tozla kaplı olmasını açıklayabilir. Son olarak, Mars'taki tuzlu su 0°C' nin altında da sıvı kalabilir. Kışın buzlu yollara tuz atarız çünkü tuz buzun erime sıcaklığını -21°C'ye kadar indirir. *Phoenix* yüzey aracı tarafından Mars toprağında magnezyum veya kalsiyum formunda bulunduğu belirlenen perklorat tuzuysa suyun donma noktasını -60°C'nin altına çekebilir.

Mars'ın erken dönemiyle ilgili gerçek ne olursa olsun, Mars'ın küçük boyutu nihayetinde yaşanabilirliğini zedelemiştir. Küçük nesneler büyük olanlardan daha çabuk soğuduklarından, iç ısı da daha çabuk kaybolur; bu yüzden volkanik hareketler Mars'ta uzun zaman önce sona erdi. Volkanizm olmadan Mars'ın karbondioksit çevrimini gerçekleştirememiş ve karbondioksitin karbonatlara dönüşmüş olması gerekir. Mars'ta karbonatlar bulunsada, miktarları, kalın bir karbondioksit atmosferi tamamen karbonata dönüşseydi ortaya çıkacak olan miktar kadar fazla değildir. Bunlara ek olarak, erken dönem Mars atmosferinin bir kısmı da *çarpişma erozyonu* adı verilen sürece maruz kalmış, yani büyük kuyruklu yıldız ve asteroit çarpışmaları sonucunda uzaya saçılmış olmalı. Mars'ın kütleçekiminin az olması yüzünden atmosfer savunmasızdı. Daha sonra gazların kademeli olarak uzaya kaçması da bunlara eklenince, nihayetinde Mars seyrek atmosferiyle baş başa kaldı.

Mars'ta Yaşam Arayışı

Tüm çabalara rağmen, Mars'ta yaşam var mı veya hiç var oldu mu sorusunu yanıtlayabilmiş değiliz. 1976'da *Viking* araçları gezegendeki olası canlıları tespit etmeyi denedi; 1990'lardan beri de

biliminsanları Mars meteoritlerinde geçmiş yaşamın izlerini arıyorlar.

Viking araçları metabolizma tespiti için üç deney, organik molekül tespiti için de dördüncü bir deney yapıyordu. *Karbon asimilasyon deneyi* adı verilen ilk deney, Mars mikroplarının havadan karbon alıp almadıklarını incelemeye yönelikti. Mars toprağı (bazen suyla karışmış haldeydi) Dünya'dan getirilen karbondioksit (CO_2) ve karbonmonoksit (CO) gazlarına maruz bırakıldı; her iki gazda da radyoaktif karbon-14 izotopu bulunuyordu. Bunun sonucunda toprağın karbon-14'ü bünyesine kattığı görüldü. Fakat toprağın 160°C 'de sterilize edilmesiyle gerçekleştirilen "kontrol deneyi" sonucunda da toprağın karbon-14 içerdiği görüldü, bu da burada Mars mikroplarının değil de inorganik kimyanın işbaşında olduğunu gösteriyordu. *Gaz değişimi* denen ikinci deneyde, Mars toprağı ile Dünya'ya ait bir organik solüsyon bir araya getirildiğinde metabolizma kaynaklı gaz üretimi olup olmadığı gözlemlendi. O_2 'nin açığa çıktığı tespit edildi, ama sterilize toprakta da aynı durum gözlemlendi. Görünüşe göre topraktaki kimyasallar su veya ısı aracılığıyla bozunup O_2 üretiyordu. *Serbest kalma deneyi* adı verilen üçüncü incelemede, Mars toprağına karbon-14 içeren organikler eklendi. Marslı mikroplar organikleri metabolize etselerdi, karbon-14 içeren CO_2 açığa çıkacaktı. Gerçekten de topraktan radyoaktif gaz salımı gerçekleşti, üstelik sterilize toprakta bu durum görülmemişti. İlk başta bu durum yaşamın belirlenmesi açısından olumlu bir gelişme gibi görünüyordu. Ama biliminsanlarının çoğu topraktaki oksidanların organiklerle tepkimeye girip CO_2 oluşturduğunu ve bu oksidanların ısıyla inaktif hale geldiğini düşünüyor. Bu açıklamayı tercih etmek için bir neden de dördüncü deneyden geliyordu. Bu deneyde, bir çeşit elektronik burun olan *gaz kromatograf kütle spektrometresi* ısınan topraktan yükselen molekülleri tespit etti. Isınan toprakta, milyarda birkaç birim olan saptama sınırının ötesinde organik materyal olmadığı görüldü.

Buradan çıkarılması gereken ders, uzaylıları aramaya başlamadan önce o çevredeki inorganik kimyayı anlamamız gerektiğidir. Ancak bu şekilde yalancı pozitiflerden kaçınılabilirsiniz. Aslına bakılırsa, *Viking* biyoloji deneylerinin başındaki Harold “Chuck” Klein (1921-2001) bana *Viking* görevinin başlangıcında tam da bunu yapmak istediğini, ama finanstan sorumlu NASA yöneticilerinin buna yanaşmayıp doğrudan yaşam arayışına geçme konusunda ısrarcı olduklarını söyledi.

1980’lerde *Viking* sonuçlarının değerlendirildiği sıralarda kayda değer bir keşif yapıldı: Dünya’da zaten Mars’tan gelen kayalar vardı – Mars meteoritleri! Çarpışmalar Mars’tan birtakım kayalar koparır ve bunlardan bazıları yeryüzüne düşer. Aslına bakılırsa her yıl düşen kaya miktarı 50 kilogramı bulur, bunların çoğu okyanusa düşer. Çarpışmayla gerçekleşen erimeler sırasında bazı meteoritlerin içinde sıkışıp kalan gazların Mars kökenli olduğu *Viking* uzay araçlarının atmosfer ölçümleri tarafından doğrulandı. İçlerinde gaz bulunmayan diğer Mars meteoritlerindeyse, silikat minerallerinin bileşiminde üç farklı oksijen izotopu (^{16}O , ^{17}O , ^{18}O) vardır, bu da onların kolayca ayırt edilebilmesini sağlar. 2013 yılında sayıları altmış yediyi bulan (bilinen) Mars meteoritlerinin listesi uzamaya devam ediyor.

1996’da ALH84001 kod adlı meteoritte geçmiş yaşama dönük olası işaretler bulunduğu belirtildi. Antarktika, Allan Hills’te (“ALH”) bulunan bu ilk (“001”) Mars meteoritinin keşif tarihi 1984 idi (“84”). ALH84001 Mars üzerinde 4,1 Ga önce magmatik kayaç şeklinde kristalleşmişti. Kayanın içinde 4-3,9 Ga önce oluşmuş, yaklaşık 0,1 mm boyunda bazı karbonat globülleri bulunur, bunların içindeyse yaşamın varlığına kanıt olabilecek dört farklı kalıntı vardır: mikrofosil olduğu öne sürülen kalıntılar; mikroplar tarafından çöktildiği söylenen karbonatlar; altıgen karbon atomu halkaları içeren polisiklik aromatik hidrokarbon (PAH) kalıntıları ve bazı bakterilerde bulunanlara benzediği söylenen mineral manyetit (Fe_3O_4) kristalleri. Dünya’da, manyetotaktik bakteriler

hücrelerinin içinde, evrimsel sürecin miknatısa çevirdiği manyetik kristalleri yaparlar. Bakteriler miknatıslı pusulalarını Dünya'nın manyetik alanının doğrultusunda aşağı ve yukarı hareket etmek için kullanırlar; böylece metabolizmalarının en iyi çalıştığı konumu (aşağıda oksijen yoksunu bölgeyle yukarıda oksijen zengini bölge arasındaki sınırı) bulurlar.

Daha sonraki yıllarda yapılan araştırmalar bu dört iddianın tümünün üzerine gölge düşürdü. Mikrofosil olduğu öne sürülen yapılar yalnızca mikroba benzeyen çubuk şeklinde yapılarıdır. O zamandan beri biliminsanları benzer şekle sahip inorganik mineraller keşfettiler. Ayrıca ALH84001 üzerindeki yapılar yeryüzü mikropolarının onda biri boyuta sahiptir, bu da büyük ihtimalle temel biyokimya için gereken asgari hacmin altındadır. Buharlaştan bir sıvı, globüllerdeki karbonatı üretebilir, bu yüzden ikinci özellik olarak öne sürülen biyojenik tuzları işin içine katmak için pek bir neden yoktur. Üçüncü kanıt grubuna dönük analizler, meteoritin içine giren PAH'ların büyük çoğunluğunun meteoritin Antarktika'da geçirdiği 13.000 yıl boyunca biriktiğini ortaya çıkardı. Organik materyallerin yanmasıyla açığa çıkan atmosferik atıklarda bolca PAH bulunur. Koyu renkli meteoritler güneş ışığını gayet iyi soğururlar; yaz mevsiminde Antarktika buzullarının arasındaki su birikintilerinde öylece yatıp su ve kimyasalların çatlaklardan içeriye sızmasına izin verirler. ALH84001'in iç kısımlarında Mars kökenli PAH'lar varsa, bunlar inorganik yollardan oluşmuş olabilir. Kopuş çarpışmasından önce gerçekleşen diğer çarpışmalar kayayı ısıtmış olmalı. Bu ısınma da karbonatlardan karbon içeren gazların salınmasına neden olmuş ve bu gazların suyla birleşmesi organik maddelerin oluşmasına imkân vermiş olmalı. Son olarak, dördüncü kanıt grubuna ilişkin analizler sonucunda ALH84001 içindeki manyetitlerin yalnızca küçük bir kısmının biyojenliğe benzer şekle sahip olduğu ortaya çıktı. Bazı biliminsanları, kopuştan önce gerçekleşen ısı şokları sırasında demir karbonatlar manyetite dönüşürken farklı şekillerde manyetitler oluştuğunu,

bunların bazılarının da bakterilere benzer şekillere sahip olduğunu öne sürüyor.

ALH84001 hakkındaki tartışmalar eski kayalarda mikroskobik yaşamın bulunduğunu kanıtlamanın ne kadar zor olduğunu gösteriyor. Yeryüzündeki kayaların büyük çoğunluğunda fosil bulunmaz, bu yüzden de ALH84001'de yaşamın bulunmaması Mars'ta yaşamın var olmadığı anlamına gelmez. Aramaya devam etmemiz gerek.

Ceres: Yaşanabilirlik İçin Ciddi Bir Aday mı?

Mars ve Jüpiter'in yörüngelerinin arasında bulunan asteroit kuşağındaki milyonlarca küçük kayalık cismin en büyüğü, 950 km çapa sahip ve Güneş'ten 2,8 AU uzakta bulunan Ceres'tir. Ceres'in yüzeyinde kil mineralleri ve donmuş su bulunur. Tıpkı Mars'taki gibi kilin varlığı geçmişte sıvı suyun bulunduğuna işaret eder. Ceres'in iç yapısına dönük en yaygın kabul gören modele göre, kayalık bir çekirdeğin üstünde 100 km kalınlığında buzdan bir kabuk bulunur. Çekirdeğin hemen üstünde bir yüzeyaltı okyanusu olma ihtimali vardır. Bu okyanus çok tuzlu olabilir, dolayısıyla sıfır derecenin altındaki sıcaklıklarda varlığını sürdürebilir; bir zamanlar yüzeye kadar ulaşmış da olabilir.

Ceres okyanusunun tabanındaki hidrotermal bacalarda yaşam olabilir mi? Ceres o kadar küçüktür ki artık iç ısını kaybetmiş olması gerekir, bu yüzden biyokütlesi de son derece küçük olacaktır. Belki de geçmişte Ceres yaşama daha elverişliydi. NASA'nın *Dawn* uzay aracının bildireceği kızılötesi emisyon ve yansıtılan güneş ışığı spektrumları, bize yüzey bileşimi ve yaşanabilirlik hakkında epey bilgi sunabilir.

Jüpiter'in Buzlu Galileo Uyduları

Asteroit kuşağının ötesinde bulunan Jüpiter, 5. Bölüm'de ortaya koyduğumuz nedenler dolayısıyla astrobiyoloji için gerçekçi bir hedef değildir. Ama Jüpiter'in altmış yedi uydusu ve bunlardan üçünün yaşama elverişli olma olasılığı vardır. 1610'da Galileo en büyük dört uyduyu keşfetti; bunlar Jüpiter'e en yakın olanından başlayarak Io, Europa, Ganymede ve Callisto'dur (Şekil 9). Io ve Europa'nın boyutları Ay'a yakındır, Ganymede ve Callisto'nun boyutlarıysa Merkür'le kıyaslanabilir. En dıştaki üç uydunun iç kısımları kayalık, dışları buzla kaplıdır; Io'nun dış kısımları ise sadece kayalıktır. Io, Europa ve Ganymede'in demir çekirdeğe sahip olma olasılıkları da yüksektir.



Şekil 9. Jüpiter'in Galileo uyduları: Io, Europa, Ganymede ve Callisto

Io Güneş Sistemi'nin en volkanik gök cisimidir; yanardağlarından çıkan sülfür dioksit Io'nun yüzeyinde donar. Ancak Io'da sıvı su bulunmaz ve üzerinde yaşam bulunmadığına da eminiz. Io son derece volkaniktir çünkü uydu eliptik yörüngesinde dönerken Jüpiter kaynaklı kütleçekim kuvvetinin büyüklüğü sürekli değişir, bu da Io'nun bir stres topu gibi sıkılmasına neden olur. Io'nun bu *gelgitsel ısınmasının* (*tidal heating*) nedeni, katı materyalin (tıpkı Dünya okyanuslarında görülen gelgit sırasında suyun kabarması ve geri çekilmesi gibi) bir yukarı bir aşağı hareketinden kaynaklanan sürtünmedir. Io'nun yörüngesi eliptik olmak zorundadır

çünkü periyodik olarak Europa ve Ganymede tarafından kütleçekim etkisine maruz kalır. Ganymede, Europa ve Io'nun yörüngelerinde bir tur tamamlama süreleri 4:2:1 oranına sahiptir; uyduların aynı hizaya gelmesi diğerlerini kütleçekimsel olarak dürtmelerine neden olur. Bu ilişkiye *Laplace rezonansı* adı verilir (adını 2. Bölüm'de bahsettiğimiz Fransız matematikçi Pierre-Simon Laplace'dan alır).

Europa da eliptik bir yörüngeye sahip olmak zorundadır, bu yüzden onda da gelgitsel ısınma görülür. Europa Io'ya kıyasla Jüpiter'e daha uzak olduğu için daha az ısınır. Europa'nın buzlu yüzeyinin ortalama sıcaklığı -155°C 'dir, ama gelgitsel ısınma buzun altında sıvı su bulunmasını sağlayabilir. Çarpışma kraterlerinin yoğunluğu yalnızca 20-180 Ma yüzey yaşına işaret eder, bu da alt katmanlarda eriyen buzların yüzeyi yeniden biçimlendirmesiyle tutarlıdır. *Kaotik topraklara* –yani kaymış bloklar içeren bozulmuş yüzeylere– ait görüntüler, yüzeyaltı buzlarının ısı yayabildiğine işaret eder. Çizgi ve sırtlardan oluşan bir küresel ağda, yüzeyin yarılp açıldığını ve buradan buzların açığa çıktığını gösteren bantlar da bulunur. Yüzeyde magnezyum sülfat tuzları vardır, bu tuzlar iç kısımlardaki sulardan kaynaklanıyor olabilir.

Europa'nın yüzeyaltı okyanusuna dair en önemli kanıt, 1995'ten 2003'e kadar Jüpiter'in etrafında dönen NASA *Galileo* uzay aracının yaptığı ölçümlerden geliyor. Dünya veya Jüpiter'den farklı olarak, Europa'nın iç kısımları kendi içsel manyetik alanını yaratmaz. Ama Jüpiter'in geniş manyetik alanından geçtiği için Europa'nın içinde elektrik akımları oluşur. Bu akımlar da zayıf ve değişken bir manyetik alan indükler. Bu alanın kuvveti, Europa'nın yüzeyinin 200 km derininde elektriği iletebilen bir sıvı bulunmasını gerektirir. En akla yatkın açıklama, Dünya'dakinin iki katı hacme sahip tuzlu bir okyanusun varlığıdır. En geniş kraterler okyanus üzerindeki buz katmanının en azından 25 km kalınlığında olduğuna işaret ediyor. Fakat uç veren bazı araziler yüzeyin birkaç kilometre altında eridikten sonra tekrar donan buzlar tarafın-

dan da üretilmiş olabilir. Dolayısıyla sığ, mercek biçiminde göller var olabilir.

Yaşam olasılığı, sıvı suyun yanı sıra enerji kaynaklarının, ara yüzeylerin ve yaşamsal elementlerin bulunmasına bağlıdır. Eğer Europa da karbon zengini meteoritler veya kuyruklu yıldızlara benzer bir malzemeden yapıldıysa, büyük ihtimalle yeterli miktarda biyojenik elemente sahiptir. Dahası, su ile deniz tabanındaki kayaların ısı veren tepkimeleri enerji ve besin de sağlayabilir. Kayalar içindeki (potasyum, uranyum ve toryum gibi) radyoaktif izotopların bozunmasıyla açığa çıkan *radyojenik ısı* da deniz tabanı bacalarının oluşmasına olanak tanıyıp kemoototroflar için karbondioksit ve hidrojen sağlayabilir.

Okyanusta oksijen bulunması, deniz tabanındaki demir ve hidrojenin oksitlenmesini de sağlar. İki küçük oksijen kaynağı vardır. Jüpiter'in manyetik alanında tutulan yüklü parçacıkların Europa'nın buzlu yüzeyine çarpıp su moleküllerini parçalaması oksijen açığa çıkarır. Buz çalkalanırsa oksijenin bir kısmı aşağıdaki okyanusa taşınabilir. Diğer oksijen kaynağıysa radyoaktif elementlerden gelen radyasyonla ayrılan su molekülleridir. Europa'nın biyokütlesine dönük tahminler Dünya'nın binde biriyle milyarda biri arasında değişiyor. Hatta bazı iyimserler hayvan benzeri canlılar için yeterli oksijenin var olduğunu bile öne sürüyorlar!

Ganymede ve Callisto'da gerçekleştirilen indüklenmiş manyetik alan ölçümleri de daha derinlerde, sırasıyla yaklaşık 200 km ve 300 km derinlikte yüzeyaltı okyanuslarının varlığına işaret ediyor. Ganymede'in ortalama yüzey yaşı yaklaşık 0,5 Ga'dır, dolayısıyla okyanusu muhtemelen yakın zamanlarda yüzeye fışkırmamıştır. Ganymede Jüpiter'in en büyük uydusu olduğu için, iç kısımlarında okyanusun altında uzanan yüksek basınçlı buz formları bulunabilir. Kaya-su arayüzeyinin bulunmaması Ganymede'i Europa'ya kıyasla yaşam için daha az elverişli kılıyor olabilir. Gelgitsel ısınmanın düşük olması da daha küçük bir biyokütleye işaret eder.

Callisto'da bir yüzeyaltı okyanusunun bulunduğu sonucuna varılması şaşırtıcı çünkü Callisto gelgitsel ısınmaya sahip değildir. Bu ısınmanın kaynağı radyojenik olmalı ve donma noktasının düşmesi için okyanus tuzlarla dolu olmalıdır. Calisto'nun yüzey yaşı 4 Ga'dır, o yüzden de okyanus yaşamına dönük kanıt bulma ihtimali oldukça düşüktür. Daha az enerjiye sahip olduğu için de eğer biyokütle varsa bile büyüklüğü Ganymede'inkinden bile az olmalıdır.

Enceladus ve Titan: Satürn'ün Buzlu Uyduları

Satürn ve altmış iki uydusunun Güneş'e olan uzaklığı Jüpiter'in-kinin iki katıdır. Uzay Çağı'ndan önce keşfedilen en büyük uydular (içten dışa doğru) şunlardır: Mimas, Enceladus, Tethys, Dione, Rhea, Titan, Hyperion, Iapetus ve Phoebe.

Encaladus'un jeolojik olarak aktif olması onu özel kılar. Satürn'ün altıncı en büyük uydusu olmasına rağmen 500 km'lik çapıyla neredeyse Büyük Britanya'ya sığar. Dione Satürn etrafında bir turunu tamamladığında Enceladus iki tur atmış olur. Bunun sonucunda, Dione'dan gelen periyodik kütleçekimsel etkiler Enceladus'un yörüngesini eliptik olmaya zorlar, bu da Satürn'den gelen değişken kütleçekim kuvvetlerinin Enceladus'u esnetip ısıtmasına neden olur. Tam olarak anlaşılamayan nedenlerden dolayı ısı Enceladus'un güney kutbunda yoğunlaşır. Orada buz parçacıkları ve gazlar *kaplan çizgileri* adı verilen paralel çatlaklardan dışarıya püskürür. Kaplan çizgileri yaklaşık 130 km uzunluğunda, 2 km genişliğindedir ve yükseltilerle çevrilidir. Püskürtülerde metan, amonyak ve organik bileşiklerin yanı sıra tuzlar bulunur. Aslına bakılırsa, bu püskürtüler Encaladus'un yörüngesinin de içinde bulunduğu Satürn'ün "E-halkası"na parçacık tedariği yapar.

Enceladus'un kayadan bir çekirdeği, buzdan bir kabuğu ve gayzer bölgesinin altında bir yeraltı denizi vardır. Organik moleküller, enerji ve sıvı su kombinasyonu Enceladus'un iç kısımların-

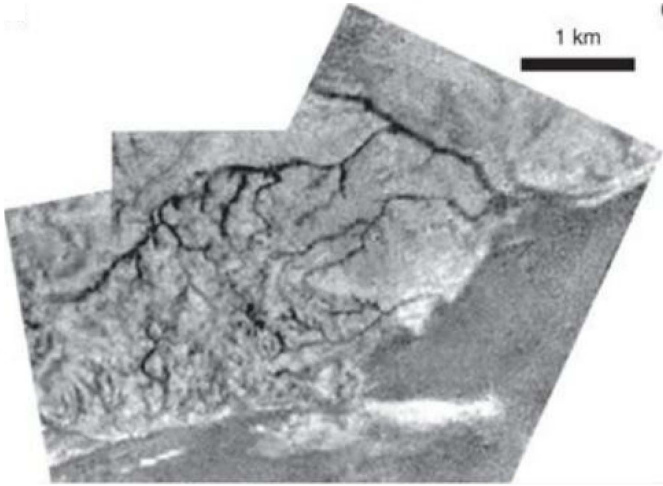
da yaşamın var olabileceğine işaret ediyor. Böyle bir yaşam kemoototrofik olacak ve su-kaya tepkimeleriyle açığa çıkan hidrojenle veya radyoaktiviteyle ayrılan sudan gelen oksijenle beslenecektir. Eğer orada yaşam varsa, gayzerlerden çıkan metan ve organik madde biyolojik olabilir.

Satürn'ün en büyük uydusu Titan da astrobiyolojik açıdan ilginçtir. Büyüklüğü Ganymede'e ve Merkür'e yakındır ve Güneş Sistemi'nde kalın bir atmosfere sahip olan tek uydudur. Titan'ın yüzeyinde hava basıncı 1,5 bar seviyesindedir, bu da Dünya'nın yüzeyindekinden yüzde elli daha fazladır. Yüzde doksan beş azot ve yüzde beş metandan oluşan atmosfer 10°C'lik bir sera etkisi sağlasa da, Satürn'ün uzaklığında güneş ışığının yoğunluğu Dünya'dakinin yüzde birine denktir, bu yüzden Titan'ın yüzeyi aşırı soğuktur (-179°C).

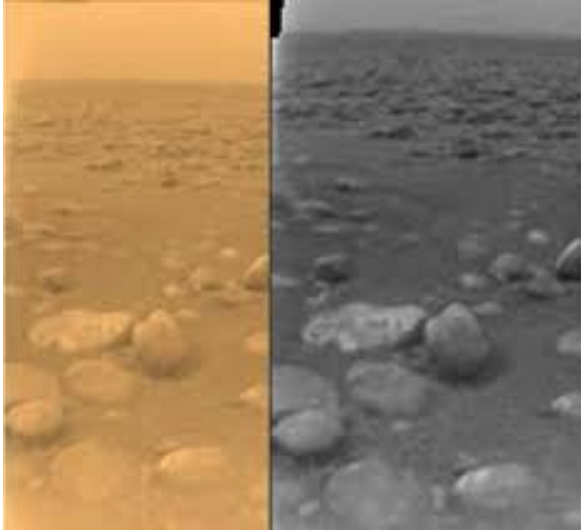
Titan'ın atmosferi hidrokarbonlardan oluşan sisli bir duman içerir. Yükseklerde morötesi güneş ışığı metan (CH₄) moleküllerini parçalar; takip eden tepkimelerde etan (C₂H₆), asetilen (C₂H₂), propan (C₃H₈), benzen (C₆H₆) gibi hidrokarbonlar ve poliaromatik hidrokarbonlar içeren kırmızımsı-kahverengi partiküller oluşur. Bu partiküller *tolin* olarak adlandırılır (*tholos* Yunancada "çamurlu" anlamına gelir).

Metandan elde edilen ürünler çökerek atmosferin dışına taşınır. Aslına bakılırsa, Titan'ın yüzeyinin yüzde 20'si kum boyutlarındaki partiküllerden oluşan tropikal çöllerle kaplıdır; bu partiküller organik moleküllerden oluşmasa bile en azından onlarla kaplıdır. Kutuplardaki 400'den fazla göl sıvı propan, etan ve metan karışımından oluşur; bu göllerin benzen ve asetilenden oluşan olağanüstü plajları vardır.

Titan'da bulunan metan, Dünya'da suyun davrandığı gibi davranıp bulutlar, yağmurlar ve nehirler oluşturur. Titan hakkındaki bilgilerimizin büyük çoğunluğunu 2004'te gerçekleşen *Cassini-Huygens* görevine borçluyuz. *Huygens* 2005'te Titan üzerine iniş yaptı, *Cassini* ise Satürn'ün yörüngesine girdi. *Huygens*'in iniş



(b)



Şekil 10. a) Bir kanal ağı Huygens iniş bölgesi yakınlarındaki bir düzlüğe akıyor gibi görünüyor; b) Huygens iniş bölgesinin yüzey görüntüsü. Ön planda görülen 10-15 cm büyüklükteki taşlar daha koyu, ince taneli bir katmanın üstünde duruyor.

bölgesinin yakınlarında sıvı hidrokarbonlar tarafından oluşturulmuş kanallar vardı (Şekil 10). İniş bölgesindeyse sıvı metan nehirlerince taşınmışa benzeyen (su veya karbondioksit buzundan oluştuğu düşünülen) yuvarlak çakıltaşları vardı. Metan yağmurlarının nadiren gerçekleşmesi gerekir, ama yağış gerçekleştiğinde sağanak şeklindedir.

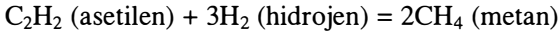
Metan güneş ışığı tarafından yok edildiği için, yaklaşık 30-100 milyon yıl sonunda yenilenmediği takdirde Titan atmosferinde metan kalmayacak. Metan'ın nasıl üretildiği gizemini koruyor. En çok kabul gören hipoteze göre, metan Titan'ın iç kısımlarından sızıyor olmalı. Bu da Titan'ın iç kısımlarında jeolojik hareketlilik olması gerektiği anlamına gelir.

Titan tamamen katı olamayacak kadar esnektir, bu da Titan'da yüzeyaltı okyanusu bulunduğuna dair bir kanıttır. Titan'ın yörüngesinin garipliği, bu uydunun Satürn'ün kütleçekimi tarafından sıkıştırılıyor olduğunu kanıtlar. 100 km'den daha az kalınlıktaki buzdan kabuğun altında okyanus bulunur. Ama Ganymede'de olduğu gibi, deniz tabanı kayalık değil yoğun buzdan oluşuyor olmalı, çünkü Titan'ın kütlesi böyle yüksek basınçlı buz formlarının oluşması için uygundur.

Titan'da iki tür yaşam olabilir: yüzeyaltı okyanusunda Dünya benzeri bir yaşam ve hidrokarbon göllerinde "tuhaf yaşam". İlk olasılıkta, Titan oluşurken küçük cisimlerin yakalanmasıyla açığa çıkan ısıнын yüzeyde geçici bir süre için sıvı su oluşturmuş olması gerekir. Su bazlı bir yaşam evrilmiş ve okyanus yeraltına çekilirken de varlığını sürdürmeyi başarmış olabilir.

"Tuhaf yaşamın" biyokimyasal karmaşıklığı sınırlı olacaktır çünkü şekerler, amino asitler ve nükleotitler için oksijen gerekmesine rağmen mevcut oksijen az miktardadır. Titan uzaydan oksijen içeren bazı moleküller yakalasa da bunlar çok küçük ölçeklidir. Soğuk hidrokarbon çözücülerindeki varsayımsal yaşam enerji için asetilen kullanabilir. Dünya'da asetilen kaynak aletinde oksijenle yanar. Ama Titanlılar asetileni Titan havasındaki hidro-

jenle metabolize edebilirler. Bu kimyasal reaksiyon,



enerji üretir ama bu fikir varsayımsaldır. Bence Titan'da “tuhaf yaşamın” esas sorunu, sıvı hidrokarbonların genomlar için hayati önemde olan büyük molekülleri çözmekte yetersiz kalmasıdır. Büyük moleküller sıvı hidrokarbonlarda küçük moleküllere kıyasla daha az çözünür. Dahası, düşük sıcaklıklarda çözünürlük azalır.

Bazı ötegezegenlerde Titan'dakine benzer sıvı hidrokarbonlar bulunabilir. Güneş'ten daha küçük ve soğuk olan kırmızı cüceler evrende en çok bulunan yıldızlardır. Bu türdeki yıldızlara 1 AU uzaklıktaki ötegezegenlerin yüzey sıcaklığı sıvı su değil sıvı hidrokarbon aralığında olacaktır. Demek ki, eğer Titan'da “tuhaf yaşam” keşfedebilirsek, bizimkinden tamamen farklı yaşamla dolup taştan bir evren hayal etmek mümkün hale gelir. İronik bir şekilde, bu durumda “tuhaf yaşam” denmesi gerekenler biz olacağız.

Triton: Neptün'ün Yörüngesine Yakalanmış Bir Kuiper Kuşağı Cismi

Güneş'e 30 AU uzaklıktaki Neptün'ün yörüngesinde ve ötesinde cisimler azot buzuyla kaplıdır. Neptün'ün on üç uydusunun en büyüğü Triton ve Plüton aslında *Kuiper Kuşağı Cisimleri*'dir. *Kuiper Kuşağı* Güneş Sistemi düzleminde 30-50 AU uzaklıkta bulunan, Güneş Sistemi oluşurken artakalan buzlu cisimlerin oluşturduğu bir bölgedir. 1000 AU kadar uzağa saçılmış Kuiper Kuşağı Cisimleri de vardır. Triton'un Neptün tarafından “yakalandığını” söylüyoruz çünkü yörüngesinin iki özelliği buna işaret ediyor: Triton Neptün'ün tersi yönde döner ve yörünge düzlemi Neptün'ün ekvatoruyla 157°'lik bir açı yapar.

Triton'un yüzeyi dehşet verici derecede soğuktur, yaklaşık -235°C'dir, çünkü güneş ışığının yüzde 85'ini geri yansıtır. Son

derece ince bir azot atmosferi 20 milyonda bir bar yüzey basıncı uygular. Bu “hava” aslında Triton’da görülen sıcaklıkta azot buzunun üstünde duran azot buharıdır. Cüzi miktarda (azotun yüzde 0,03’ü kadar) bulunan metan, morötesi güneş ışığıyla parçalanıp hidrokarbon parçacıklarından oluşma ince bir sis oluşturur. Eğer metan 4,5 milyar yıl boyunca bu hızda parçalanmışsa yaklaşık bir metre kalınlıkta organik materyal birikmiş olması gerekir. Ama hareket halindeki buzullar bunların üstünü kapatacaktır. Bazı buzullardaki hafif kırmızımsılık organik kaynaklı olabilir. Güneş bazen azotu buharlaştırarak gayzer benzeri gaz sütunları oluşturur; bunların taşıdığı koyu renkli partiküller de organik olabilir. Bazı yüzeylerde azot buzunu dışında su ve karbondioksit buzunu da bulunur.

Triton jeolojik olarak aktiftir çünkü krater sayımları yüzeyin sadece 10 Ma yaşında olduğunu gösterir ve Triton’da ayrıca bacalar, çatlaklar ve lavlar gibi buzlanmış yapılar bulunur. Lav ve magmaların yerini sulu buzun aldığı bu yapıları *buz volkanları* (kriyovolkanlar) olarak adlandırırız. Triton’un yoğunluğu, geniş ve kayalık bir çekirdeğin buz volkanları için yeterli radyojenik ısıya sahip olabileceğine ve Triton’da bir yüzeyaltı amonyak-su okyanusu bulunabileceğine işaret eder.

Erken dönemlerinde Triton yaşama daha elverişli koşullar sunmuş olabilir. Yakalanmasının hemen ardından Triton’un yörüngesi epey eliptik olacağı için, Neptün’den gelecek muazzam gelgitel ısı erimeye neden olmuş ve çok yaygın bir yüzeyaltı okyanusu oluşturmuş olmalı. Gelgitler yörüngeleri daireselleştirdiği için günümüzde Triton’un yörüngesi dairesel yakındır. Yakalanmanın ardından gelgitel ısı azaldıkça buz kabuğu kademeli olarak kalınlaşmış olmalı. Günümüzde okyanus yüzlerce kilometrelik buzun ve yüksek basınç buz formlarının altında uzanıyor olabilir. Okyanus yaşamı derinlerde gizli olsa bile, buz volkanlarının varlığı, yüzeyde organik madde örnekleri bulabilirsek yaşama dair izler bulma ihtimalimizin de olduğunu gösteriyor.

Plüton'un Bir Yeraltı Okyanusu Var mı?

Adını yeraltı tanrısından alan Plüton'un, büyük çoğunlukla azot buzuyla kaplı bir yüzeyi ve 8-15 mikrobare yüzey basıncına sahip ince bir azot atmosferi vardır. Tıpkı Triton ve Titan'da olduğu gibi burada da güneş ışığı tarafından parçalanan az miktarda atmosferik metan da bulunur. Aynı şekilde, bu durum hidrokarbon parçacıklarının üretilip çökmesine neden olur; Plüton'un yüzeyinde görülen karanlık bölgelerin açıklaması çöken bu hidrokarbon parçacıkları olabilir.

Plüton ile bir başka Kuiper Kuşağı Cismi'nin çarpışmasının Plüton'un beş uydusunun en büyüğü olan Charon'u ortaya çıkardığı düşünülüyor (Ay'ın oluşmasına neden olan çarpışmaya benzeyen bir olay). Demek ki Plüton aslında iki kere Kuiper Kuşağı Cismi'dir. Charon'un boyutu Plüton'ununkinin yarısıdır, kütleseyse Plüton'ununkinin dokuzda biridir. Charon Plüton'un etrafındaki dönüşünü 6,4 günde tamamlar. Charon'u oluşturan çarpışmanın ardından gelgitsel ısınma kaynaklı erime, Plüton'da bir yüzeyaltı okyanusu oluşturmuş olmalı. Plüton'un muhtemelen kayalık olan çekirdeği, günümüzde de amonyak zengini suyla dolu yüzeyaltı okyanusuna yetecek kadar radyojenik ısı sağlayabiliyor olmalı.

Plüton'un okyanusunda yaşayan organizmaların sınırlı bir enerji kaynağı olacağından, buradaki biyokütle Europa'dakinden çok daha küçük olacaktır. Okyanuslar büyük ihtimalle 350 km'den daha derinlerde bulunacak ve gelecekteki uzay görevlerinde onlara ulaşmak zor olacaktır, fakat orada yaşam bulunması ihtimalini de göz önünde bulundurmalıyız.

Plüton ile ilgili yaptığımız değerlendirmeler yaşamın hiç beklenmedik yerlerde var olabileceğini ve Tablo 1'de oluşturduğum listenin belki de fazla muhafazakâr olduğunu gösteriyor. Güneş Sistemi'nin dış kısımlarındaki pek çok soğuk cisim eskiden potansiyel yaşam alanları olarak değerlendirilmiyordu. Ama algılar

değiştirdi. Satürn'ün uydusu Rhea, Uranüs'ün en büyük uyduları Titania ve Oberon gibi cisimlerde yüzeyaltı amonyak zengini okyanuslar bulunuyor olması mümkün. Plüton'a benzer bir boyutta ama Güneş'ten 100 AU uzaklıkta bulunan Sedna gibi büyük Kuiper Kuşağı Cisimleri için de aynı olasılık geçerli. Güneş Sistemi'ndeki çok sayıdaki cismin yaşam potansiyeline sahip olması, galaksimizde bunlara benzer milyarlarca ihtimal olduğunu gösteriyor.

Uzak Dünyalar, Uzak Güneşler

Ötegezegenlerin Peşinde

Astronomlar Güneş Sistemi'nin ötesinde, bazıları aday bazıları tescilli olan 3400'den fazla ötegezegen keşfettiler. Büyük cisimleri belirlemek daha kolay olduğu için bunların neredeyse tümü Dünya'dan büyük ve bazıları oldukça egzotik. Ana yıldızlarından en fazla 0,5 AU uzaklıkta bulunan Jüpiter boyutundaki gezegenler *Sıcak Jüpiterler* olarak biliniyor; bunlardan bazıları yörüngede dönüşlerini yalnızca birkaç günde tamamlıyorlar. Bir de isimleri steroid kullanan bir Dünya'yı çağrıştıran *Süper Dünyalar* var. Bu gezegenlerin kütleleri gezegenimizinkinin on katına kadar çıkabiliyor. Onları bulmak daha zor olsa da, çok sayıda Dünya boyutunda ötegezegen bulmamız sadece zaman meselesi. Acaba bunlardan kaç tanesi yaşanabilir olacak ve hatta kaç tanesinde halihazırda yaşam olacak?

Elbette *yaşanabilir* ötegezegen tespit edebilmek için önce ötegezegenler bulmamız gerekiyor. Çok büyük uzaklıklar söz konusu olmasına rağmen astronomlar yine de iki yöntem belirlemeyi başardılar. Bunlardan ilki *dolaylı tespittir*; bu yöntemde astronomlar konum ve parlaklık gibi yıldız özelliklerine bakarlar, zira bunlar görünmeyen gezegenlerin varlığından etkilenir. İkincisiyse, bir gezegenin görüntüsünden veya ışığının spektrumundan yararlanılarak yapılan *doğrudan* tespittir.

Dolaylı tespit yöntemleri şunlardır: astrometri, yıldızlarda Doppler kayması, geçişler ve kütleçekimsel mikromerçekleme. İlk ikisinin temelinde, bir gezegen ve yıldızın ortak bir kütle merkezine sahip yörüngelerde hareket etmesi yatar. Örneğin eğer bir yıldız ve gezegen tam olarak aynı kütleyle sahip olsalardı, ikisi arasındaki uzaklığın tam ortasındaki bir noktanın etrafında dönmeleri gerekirdi. Gerçekteyse bir gezegen bir yıldızdan daha küçüktür, bu yüzden kütle merkezi yıldızda daha yakındır ve bazen yıldızın içindedir. Fakat her halükârda yıldız kütle merkezinin etrafındaki küçük bir yörüngeyi takip eder ve gezegeni göremezsek bile bu gezegenin neden olduğu “yalpalama” (*wobble*) gözlemlenebilir. Güneş Sistemimizde, Jüpiter’in on iki yıllık yörüngesi, Güneş’in konumunda on iki yıllık yalpalamalara yol açar. Güneş’in çevresinde dönüşünü yirmi dokuz yılda tamamlayan Satürn buna daha küçük, yirmi dokuz yıllık bir yalpalama daha ekler.

Astrometri teleskop vasıtasıyla gökyüzündeki bir yıldızın hareketlerinin ölçülmesidir. Yıldızlarından uzak büyük gezegenleri de belirleyecek kadar hassas olduğundan, bizimkine benzeyen gezegen sistemlerini aramak için de kullanılabilir. Ama yıldızlarından çok uzaktaki gezegenlerin etkilerini takip edebilmek için yıllar hatta on yıllar boyunca beklemek gerekir.

Doppler kayması veya *radial hız* yöntemi denilen ikinci yöntemse, bir yıldızın ışığı tüm renklerine ayrıldığında spektrumda tıpkı bir barkoda benzeyen koyu bantların oluşmasına dayanır. Yıldız atmosferindeki elementler yıldızın iç kısmından gelen fotonları absorbe eder, bu da koyu çizgilere neden olur. Eğer yıldız Dünya’ya yaklaşır veya ondan uzaklaşırsa, çizgiler sırasıyla daha yüksek (daha mavi) veya daha düşük (daha kırmızı) frekanslara kayar. Herkes ses dalgalarında *Doppler etkisini* deneyimlemiştir. Sirenleri açık bir polis aracı yaklaşırken ses dalgaları sıkışıp yüksek frekanslı tiz bir ses oluşturur, araç geçip giderken de siren düşük frekanslı, tekdüze bir sese dönüşür. Benzer bir frekans kayması ışıktaki da gerçekleşir. Bir yıldız spektrumunda ritmik olarak

gözlenen kırmızıya ve maviye kaymalar, o yıldızın yalpaladığını ve çevresinde bir gezegen bulunduğunu gösterir. Kaymanın boyutu gezegenin kütlesine işaret ederken, kaymanın hızıysa gezegenin yörüngeyi tamamlama zamanını belirtir.

1995 yılında, Geneva Üniversitesi'nden (o zamanlar öğrenci olan) Didier Queloz ve hocası Michel Mayor, Doppler kaymasını kullanarak ilk defa Güneş benzeri bir yıldızın yakınlarında bir gezegen olduğunu keşfettiler. Pegasus takımyıldızındaki bir yıldızın etrafındaki yörüngesini dört günde tamamlayan ve en az Jüpiter'in yarısı kadar kütleye sahip olan bir gezegendi bu. Büyük bir sürpriz olmuştu. Hiç kimse ana yıldızına bu kadar yakın bir dev gezegen bulmayı beklemiyordu çünkü dev gezegenlerin o konuda oluşamaması gerekiyordu. Artık biliyoruz ki, Güneş Sistemi'nin dışındaki bazı gezegenler tarihlerinin erken bir döneminde gezegen göçü gerçekleştirebiliyorlar ve bu sürecin sonunda geriye ne kaldığını gözlemleyebiliyoruz. 2012 yılında, Doppler verileri yalnızca 4,3 ışık yılı uzaklıkta, kütlesi Dünya'ya eşit ve Alpha-Centauri B yıldızının etrafında dönen bir gezegen bulunabileceğine işaret etti. Eğer gezegen gerçekten varsa* Alpha-Centauri B'ye 0,04 AU gibi çok yakın bir mesafede olduğu için yüzeyi de eriyik kayaçlardan oluşmalı.

Doppler kayması yöntemini uygularken dikkat edilmesi gereken bir nokta, gezegen sistemini nasıl gördüğümüzdür. Eğer yörünge düzlemi bize cepheden (*face-on*) bakıyorsa (yani görüş çizgisine dik bir düzlemle aralarında 0 derecelik bir eğim varsa) Doppler kayması yoktur. Yörünge düzlemi ne kadar eğikse Doppler kayması da o kadar büyüktür. 90 derecelik bir eğimde yani yörünge düzlemi kenardan (*edge-on*) görüldüğünde kayma azami seviyeye ulaşır. Çoğunlukla eğim açısını bilmenin bir yolu yoktur, o yüzden ölçülen Doppler etkisi ideal kenardan gözlem durumun-

* 2015 yılında Oxford Üniversitesi'nden bir grup astronom bu gezegenin var olduğuna dair kanıtları çürüttü. —y.n.

dan daha küçük olabilir, bu da yalnızca *asgari* bir gezegen kütlesi çıkarsamamıza olanak tanır. Doppler tekniği yıldızlarına yakın büyük gezegenlerde en hassas sonuçları verir, bu da ilk başta belirlenen gezegenlerin çoğunun neden sıcak Jüpiterler olduğunu açıklar. Oysa geçiş yöntemi sayesinde artık ötegezegenlerin yalnızca yaklaşık yüzde 0,5 ila 1'lik küçük bir kısmının sıcak Jüpiterler olduklarını biliyoruz.

Geçiş yöntemi, bir gezegen yıldızın önünden geçtiğinde yıldızın ışığında meydana gelen azalmayı ölçen bir yöntemdir; buna benzer bir durumun yaşanması için bir ötegezegen sistemini tam kenardan gözlemleyecek kadar şanslı olmanız gerekir. İstatiksel olarak böyle bir geometri nadiren görülse de, yıldızların sayısı çok fazla olduğu için yeterince geniş bir alanda ve uzun süre gözlem yaparsanız geçişleri gözlemleyebilirsiniz. Eğer yıldızın yaklaşık büyüklüğü belirlenebiliyorsa, yıldız ışığındaki azalmayı kullanarak bir gezegenin çapını belirlemek mümkündür. Ardından da, bu azalma döngüsü kullanılarak gezegenin yörünge periyodu ve yıldızdan uzaklığı belirlenebilir. NASA'nın *Kepler* görevi sırasında, 2009'dan 2013'e kadar Güneş etrafında dönen bir teleskop, Cygnus (Kuğu) takımyıldızında bulunan 145.000 anakol yıldızını devamlı olarak görüntüledi. Gözlemlenen yıldızların çoğu 500-3000 ışık yılı uzaklıktaydı. *Kepler* 3200'den fazla ötegezegen adayı buldu; bu gezegenler periyodik ışık azalmasına bakılarak veya Doppler kayması gibi başka bir tespit yöntemiyle doğrulandı. 2017'de Geçiş Ötegezegeni Arama Uydusu (Transiting Exoplanet Survey Satellite, TESS) teleskobu geçiş yöntemiyle iki milyon yıldızı incelemeye başlayacak.*

Dördüncü dolaylı yöntemse mikromerçeklemedir. Einstein'ın Genel Görelilik Teorisi, uzak bir yıldız ile aramızdan bir cisim geçtiğinde cismin kütleçekim alanının ışığın bükülmesine yol açacağını öngörüyor. Öndeki cisim adeta bir mercek gibi davra-

* TESS teleskobu 18 Nisan 2018'de uzaya fırlatıldı. -y.n.

narak ışığı odaklayıp uzaktaki yıldızın parlaklığının kademeli olarak artmasını sağlar. Ama eğer mercek yıldızın etrafında bir gezegen dönüyorsa, arka plandaki yıldız bir kereden fazla parlayabilir. Bu hassas yöntem bir yıldız 1,5-4 AU uzaklıktaki yörüngelere sahip Dünya kütleli gezegenleri belirleyebilir. Ne yazık ki, hizalanma (*alignment*) gerçekleştikten sonra daha detaylı ölçümler yapmak mümkün değildir çünkü cisimler genellikle birbirine çok uzaktır. Öte yandan mikromerceklemeye istatistiksel veriler toplanabilir. Yıldızlararası uzayda yalnız başına sürüklenen büyük gezegenler de mercek cisimler olarak davranabilir, bu sayede yıldızlar arasında süzülen çok sayıda Jüpiter kütleli gezegenin varlığı belirlenebilmiştir. Bu yalnız dünyalar kendi güneş sistemlerinden dışarı atılmış olmalıdır.

Astrobiyoloji için en önemli yöntemler, bir gezegendeki ışığı yakalayan *doğrudan tespitlerdir*. Bir gezegen çok daha parlak bir yıldızın yanındaki soluk bir cisim olduğu için doğrudan tespit oldukça zordur. Yine de Hubble gibi uzay teleskopları ve yeryüzünde bulunan çok büyük teleskoplar, ışığı engelleyen bir maske olan *koronograf* aracılığıyla doğrudan tespitte bulunmayı başardılar. Koronograf terimi adını, Güneş'in koronasını (Güneş tutulması sırasında görülen haleyi) incelemek için güneş ışığını engelleme tekniklerinden alır. Yeryüzündeki teleskoplar ayrıca, Dünya atmosferinin hareketliliğinden kaynaklanan bozulmaları hissedip düzelten *adaptif optikten* de faydalanır.

Bir uzay teleskobunun Dünya atmosferinden kaynaklanan bulanıklıklardan kaçınma gibi bir avantajı bulunsa da, spektrumun hangi kısmının inceleneceği sorusuna bir cevap bulmak gereklidir. Gezegenler çoğunlukla kızılötesi radyasyon yayar ve görünür yıldız ışığını yansıtırlar. Eğer Güneş Sistemimize uzaktan bakıyor olsaydık, Dünya'nın yaydığıнын on milyon katı kızılötesi ve on milyar katı görünür ışık yayan sıcak büyük Güneş yeryüzünü gölgede bırakırdı. Dolayısıyla uzak bir dünya ararken kızılötesi ışınlar görünür ışığa kıyasla bin kat daha iyi bir kontrast sağlar. Ne

yazık ki ışık herhangi bir nesneyle, mesela bir teleskopla karşılaştığında yayılıp bulanıklaşır (kırılır) ve bu durum kızılötesinde görünür ışığa göre daha fazladır. Neyse ki interferometri adındaki bir teknik istenmeyen ışığı engelleyebilir. Gürültüyü kesen kulaklıklar da aynı ilkeyi istenmeyen ses dalgalarını susturmak için kullanır.

Işık dalgalarının da tıpkı su dalgaları gibi tepe ve çukur noktaları vardır. *Sıfırlayıcı interferometri*, gökyüzündeki bir noktadan gelen ışık dalgalarını tam olarak hizalayabilmek için birden fazla teleskop aynası kullanır; bu sayede dalga tepeleriyle dalga çukurları birbirlerini sıfırlayıp ışığı karanlığa çevirir. Böylece gezegenleri görebilmek için yıldız ışığı “sıfırlanabilir”. Güneş benzeri yıldızların etrafındaki ötegezegenlerin görüntülerini ve spektrumlarını yakalayabilmek için hem NASA hem de Avrupa Uzay Kurumu, interferometri özelliğine sahip uzay teleskoplarını –*Terrestrial Planet Finder* (NASA) ve *Darwin* (Avrupa Uzay Ajansı)– kullandılar.

Bugüne dek yapılan ötegezegen araştırmaları genel olarak daha düşük kütleli ötegezegen sayısının daha fazla olduğunu gösterdi, yani evrende kayalık, Dünya boyutundaki gezegenler yaygın olmalı. Bazı ötegezegenlere yönelik yoğunluk tahminleri de bu gezegenlerin bileşimlerinin belirlenmesine olanak tanıyor. Doppler yöntemiyle belirlenen kütle ve geçiş yöntemiyle belirlenen büyüklük kullanılarak yoğunluk hesaplanabiliyor. Ayrıca, eğer geçiş yapan Dünya boyutlu gezegenin Neptün benzeri en az bir kardeşi varsa, *geçiş zamanlaması varyasyonu* adı verilen bir teknik sayesinde gezegenlerin kütlesi ve dolayısıyla yoğunluğu belirlenebiliyor. Büyük gezegen yörüngesel eğimden dolayı ana yıldızının önünden geçmese bile, bu gezegenin küçük gezegenin geçiş zamanlarında küçük varyasyonlara neden olması gezegen kütlelerinin hesaplanabilmesini sağlar. Yoğunluk ölçümleriyle beraber, hangi ötegezegenlerin gazdan, kayalardan, sudan veya bunların bir karışımından oluştuğuna dair ipuçları gittikçe artıyor.

Yaşanabilir Bölge

Güneş Sistemi'nde yaşamı değerlendirirken sıvı su içeren cisimlere yoğunlaştık çünkü Dünya benzeri bir yaşam için bunun gerektiğinden eminiz; aynı şey ötegezegenler için de geçerli. Yüze-yaltı okyanuslarına sahip kuru gezegenler uzay sondası kullanılarak araştırılmaya değer olmakla birlikte, ötegezegen astrobiyolo-jisinin hedefi bu gezegenler değil. Ötegezegenleri ziyaret etmek için uzay aracı göndermek yakın gelecekte olası görünmüyor, o yüzden bütün araştırmaların uzaklardaki ışığı gözleyen teleskop-larla gerçekleştirilmesi lazım. Sonuç olarak, en çok ilgilendiğimiz ötegezegenler yüzeyinde sıvı bulunduranlar. Bu gezegenlerde at-mosfere çok miktarda gaz pompalayan bir biyosfer mevcut olabi-lir. Gezegenden gelen ışıktaki bu biyojenik gazların belirlenmesi prensipte mümkündür ve bu gazlar o gezegende yaşam olduğuna işaret edebilir.

William Whewell 1853'te Dünya'nın Güneş Sistemi'nde "mer-kezi kavurucu bölge" ile "dışsal soğuk bölge" şeklinde tanımladı-ğı bölgeler arasında konumlandığı için gezegende sıvı su bulu-duğunu belirtti. Galaksimizin boyutlarını keşfetmiş olan Ameri-kalı astronom Harlow Shapley de (1885-1972) yıldızların etrafın-daki belirli bir bölgedeki gezegenlerin yüzeylerinde sıvı su bulu-nabileceğinden bahsetti. Günümüzdeyse, *yaşanabilir bölge* (YB) terimi bir yıldızın yakınlarında, Dünya benzeri bir gezegenin za-man içinde belli bir anda yüzeyinde sıvı su bulundurabileceği böl-geye işaret eder. YB için bir zaman belirtiriz çünkü yıldızlar yaş-lanabilir ve parlaklaşıp soluklaşabilir, bu yüzden de YB değişken-dir. YB'den farklı olarak, *daimi yaşanabilir bölge* (DYB) bir yıldız-ın yakınlarında, bir gezegenin belirli bir zaman aralığında –ge-nellikle yıldızın anakol ömrü boyunca– yaşanabilir olmaya de-vam ettiği bölgedir.

Astronomlar Güneş de dahil olmak üzere farklı tipteki anakol

yıldızlarının çevresindeki YB genişliğini hesapladılar. İç taraftaki sınır, gezegenin sera etkisinin kontrolden çıkma eğilimine bağlıyken, dış sınır genellikle karbondioksitin kuru buz bulutları şeklinde yoğunlaşacak kadar soğuk veya günışığını saçacak kadar yoğun olması nedeniyle sera etkisi ısınmasının yetersiz kalacağı nokta olarak belirlenir. İkinci durum genç Mars için potansiyel bir sorundu (6. Bölüm). Güneş için YB'nin iç sınırı 0,85-0,97 AB, dış sınırıysa 1,4-1,7 AB'dir. Değerlerin aralıklı olmasının nedeni, iç sınırlarda su bulutlarının dış sınırlarda da karbondioksit bulutlarının bilinmeyen etkileridir. Örneğin bulutlar yıldızın yakın bir gezegeni soğutabilir, bu yüzden iç sınır 0,97 yerine 0,85 olabilir. En iyimser dış sınırdaki Mars YB'nin içinde kalır. Ama Mars'ın küçük boyutları sıvı su barındıramayan seyrek bir atmosfere sahip olmasına yol açar. Bir başka deyişle, eğer Mars Dünya kadar büyük olsaydı, belki de bugün yaşanabilir olacaktı. Demek ki gezegen boyutu önemlidir ve YB yaşanabilirlik için ilk rehberimiz olmakla birlikte hikâye sadece ondan ibaret değildir.

Diğer yıldızların etrafındaki YB, o yıldızın Güneş'ten soğuk mu yoksa sıcak mı olduğuna göre daralır veya genişler. Örneğin daha soğuk olan bir K yıldızının (Şekil 1) yaşanabilir bölgesi, Merkür'ün yörüngesinden Dünya'ninkine uzanan dar bir aralıkta olacaktır. Daha da soğuk M tipi kırmızı devin yaşanabilir bölgesinin merkeziyse yalnızca 0,1 AU civarında olacaktır, yani Merkür'ün 0,4 AU'daki yörüngesinden çok daha iç kısımda.

Soluk M cücelerinin YB'si o kadar dardır ki gezegenler *gelgitsel kilitlenme* yaşar. Gelgitsel kilitlenme kütleçekiminin gezegenin rotasyon (kendi eksenini etrafında dönme) periyodunu belirlediği durumlarda gerçekleşir. Aynı fenomen Ay'ın bir yüzünün sürekli Dünya'ya dönük olmasını sağlar. Ay gelgitsel olarak kilitlenmiştir ve Dünya etrafındaki her dönüşünde kendi eksenini etrafında da dönüşünü tamamlar. Yörüngesel ve rotasyon periyotlarının eşleşmesi –yani *senkronize rotasyon*– tesadüf değildir. Ay, Dünya-Ay eksenini doğrultusunda hafifçe uzamıştır ve eğer bu konumlan-

ma bozulursa Dünya'nın kütleçekimi Ay'ın "bombelerini" tekrar hizaya getirir.

Bir M cücesinin yaşanabilir bölgesinde senkronize rotasyon gerçekleştiren bir gezegenin bir yanı aydınlıkta kalırken diğer yanını daima karanlıkta kalacaktır. Ancak bu durum gezegenlerin yaşanılabilirliğini yok etmez. Gece tarafı soğuk olabilir ama ortalama kalınlıkta bir atmosfer gece tarafını ısıtmaya yetecek kadar ısı aktarımı yapabilir, o sırada bulutlar da gündüz tarafını soğutabilir. Böyle bir gezegenin etrafında dönen büyük bir uydu da değişken bir güneş ışığı alacaktır. Yani M cücülerinin yaşanabilir bölgelerindeki gelgitel kilitlenme her şeyin sonu değildir. Bu durum rahatlatıcıdır çünkü M cüceleri en yaygın yıldız tipidir, sayıları tüm yıldızların dörtte üçüne denktir.

Geçtiğimiz yıllarda YB'yi tanımlayan varsayımlar sorgulandı. Dış sınır genellikle karbondioksit yoğunluğuyla belirlenir. Ama bazı büyük, kayalık ötegezegenler kalın, hidrojen zengini bir atmosfere sahip olabilir. Titan'a ve dev gezegenlere yönelik çalışmalar sayesinde hidrojen ve metanın sera gazı davranışı gösterdiklerini biliyoruz. Bu gazların yoğunlaşma sıcaklıkları ise karbondioksitinkinden çok daha düşüktür. Ayrıca, iç kısımda bulunan, su bakımından yoksul ve okyanuslara değil de kutup göllerine sahip olan bir gezegen kontrolden çıkmış sera etkisine yenik düşmeyebilir, çünkü ürettiği su miktarı kızılötesi radyasyona tamamen karşı koyacak opak bir atmosfer oluşturacak kadar suya sahip olmayacaktır. Dolayısıyla YB düşündüğümüzden daha geniş olabilir.

Galaktik Yaşanabilir Bölge Var mı?

Bazı astronomlar galakside yaşanabilir gezegen sistemleri için uygun bölgeler bulunduğunu öne sürüyor ve bu bölgeleri *galaktik yaşanabilir bölge* olarak adlandırıyorlar (GYB). Güneş'in Samanyolu'nun merkezinden nispeten uzak olduğunu, gök cisimlerinin yoğun olduğu merkezin yakınlarında bulunan gezegen sistemleri-

nin süpernovalara veya geçiş yapan yıldızlara maruz kalabileceğini söylüyorlar. Öte yandan, galaksinin en dış kesimlerinde hidrojen veya helyum dışındaki elementler çok az miktardadır, bu da gezegen oluşmasını engelleyebilir. Astronomların hidrojen ya da helyum dışındaki bütün elementlere “metal” demek gibi (kimyacıları delirten) bir alışkanlıkları vardır; bir yıldızın “metal” içeriğine onun *metalikliği* denir. Dev ötegezegenlere sahip olan yıldızlar demir zengini olma eğilimindedir ve öncelikle dev ötegezegenler keşfedildiği için, ilk başlarda bir nebuladan gezegenlerin oluşmasının yüksek metaliklik gerektirdiği düşünülüyordu. Daha yakın bir zamandaysa, Güneş’e yakın bir kütlesi olan bir yıldızın metalikliğiyle sahip olduğu Süper Dünyalar arasında bir ilişki olmadığı gösterildi.

Yıldızların sabit bir konumda kalmamaları da GYB açısından bir sorundur. Yakınlarda yapılan araştırmalar, galaksilerin spiral kollarının neden olduğu kütleçekimsel saçılma yüzünden yıldızların galaktik disk boyunca hareket ettiklerini gösteriyor. Ne olursa olsun, yakın gelecekte yaşama dair işaretler için incelenecek ötegezegenlerin tümü yakınlardakiler, yani bizden en fazla yüz ışık yılı uzaktakiler olacak. GYB doğru olsun ya da olmasın, yakın gelecekte yaşanabilir gezegen bulmaya yönelik çalışmalar için pratik bir değere sahip değildir.

Biyomzalar: Yaşam Olan Gezegenleri Bulma Yöntemleri

Esas soru tabii ki şu: Yaşamı bulabilir miyiz? NASA’nın *Voyager 1* uzay aracı Güneş Sistemi’nin dışına çıkıp Dünya’ya 6,1 milyar km öteden baktı. Çektiği meşhur fotoğraf bugün “soluk mavi nokta” olarak biliniyor çünkü Dünya fotoğrafta o kadar küçük ki mavimsi bir pikselden ibaret. Başka hiçbir şey bilmeseydik nasıl bir sonuca varırdık? Gezegenin renginin mavi okyanuslar ve beyaz bulutların bir karışımı olduğunu söyleseydik bu yalnızca bir tahmin olarak kalırdı. Daha iyisini nasıl yapabiliriz?

Bir ötegezegenin özelliklerini belirlemek ve yaşam izleri aramak için genellikle gezegenin görünür veya kızılötesi spektrumuna ihtiyaç duyarız. Farklı molekül ve atomlar spektrumda farklı frekansları absorbe ederler. Bu sayede, canlılar tarafından üretilen oksijen veya metan gibi atmosferik gazların varlığını araştırabiliriz. Yaşama işaret eden bunun gibi gezegen özellikleri *biyoimzalar*dır. *Voyager 1*'in soluk mavi noktasıyla aynı yıl, Jüpiter'e doğru yol alan *Galileo* uzay aracı da Dünya'nın spektrumunu elde etti. Bu bir bakıma ötegezegenler için bir provaydı ve Dünya'nın atmosferik oksijenini, metanını ve çok miktardaki suyunu tespit edebileceğimizi gösterdi. Oksijen ve metanın aynı anda bulunması yaşamın varlığına dair bir kanıttır çünkü bu iki gazdan büyük miktarlarda üreten ve dengeye gelmelerini önleyen bir biyosferin yokluğunda bu gazlar birbirleriyle hemen tepkimeye girer. Dünya'nın atmosferinin *kimyasal dengesizlik* içinde olduğunu söylüyoruz. Bu tam da ötegezegenlerde bulmak isteyeceğimiz bir biyoimzadır.

Bir yıldızın önünden veya ardından geçen ötegezegenlerin oluşturduğu spektrum değişikliklerine bakılarak ötegezegen atmosferleri hakkında şimdiden bazı bilgiler toplandı. Bir gezegen bir yıldızın önünden geçtiğinde, yıldızın ışığı gezegenin atmosferinden geçer. Yani gezegen geçtikten sonra bu spektrumdan yıldızın spektrumunu çıkarırsak, gezegenin atmosfer spektrumunu ayırabiliriz. Ya da gezegen yıldızın arkasındayken ölçülen spektrum, gezegen yıldızın yanındayken ölçülen toplam spektrumdan çıkarabiliriz. Bu da bize tüm gezegenin spektrumunu verir. Güneş'in etrafındaki yörüngesinde dönen Spitzer Uzay Teleskobu bu tekniği kullanarak sıcak Jüpiterlerin kızılötesi spektrumunu belirledi.

Daha incelikli teleskoplar kullanarak Dünya benzeri bir ötegezegenin yüzey sıcaklığını ve sıvı suya sahip olup olmadığını belirlemek isteyebiliriz. Bir spektrum bunu sağlayabilse de, yalnızca bulutların üzerinden veya üst atmosferden gelen ışığı görebiliriz. Örneğin Venüs böyle bir "örtüye" sahiptir. Benzer biçimde giz-

lenmiş ötegezegenlerin spektrumlarındaki absorpsiyon çizgilerini (koyu çizgileri) kullanarak sera gazlarının miktarını belirleyebilir ve bu sayede yüzey sıcaklığını hesaplayabiliriz. Bir ötegezegenin atmosfer bileşimini de bilirsek, orada sıvı suyun olup olmadığını belirleyebiliriz. Ani parıltılar aracılığıyla okyanuslar da tespit edilebilir. Son olarak, *anti-biyomzaları* da göz önünde bulundurmak gerekir. Mikrobiyal yaşam hidrojen ve karbonmonoksit gazı tükettiği için, iki gazdan birinin yüksek miktarda bulunması yaşanabilir bir gezegenin anti-biyomzası olarak değerlendirilir. Anti-biyomzalar temelde “evde kimse yok” demektir.

Dünyadışı Akıllı Varlık Arayışı

Ötegezegenlerde yaşam arayışına yönelik farklı bir yaklaşım da teknolojik uygarlıkların var olduğu hipotezinden yola çıkmaktır. Eğer bu doğruysa, onlarla iletişim kurmaya çalışabiliriz. Bu girişim dünyadışı akıllı varlık arayışı (SETI) veya daha genel olarak *teknomza* arayışıdır.

1959 yılında Guiseppe Cocconi ve Philip Morrison büyük radyo teleskopları kullanarak dünyadışı uygarlıkların yayınlarını arayabileceğimizi savundular. Daha sonraysa görünür ışıktaki sinyalleri izlemeyi teklif edenler oldu. Yalnızca bu sinyalleri aramak için pratik nedenler var. Örneğin X ışınları üst atmosferde absorbe edilirken, kolayca üretilen radyo dalgaları ve görünür ışık uzayda tespit edilebilir. Dünyadışı akıllı varlık arayışı açısından asıl soru, aramaya değip değmeyeceği, uzayda yeterince uygarlık olup olmadığı sorusudur.

1961’de, o zamanlar Cornell Üniversitesi’nde çalışan Frank Drake sinyal yayan uygarlıkların potansiyel sayısını tahmin etmek için bir yöntem ortaya attı. Eğer her yıl “yayın yapan” uygarlıkların ortalama sayısını ve ortalama yaşam sürelerini hesaplasak, bu büyüklükleri çarparak sinyal yayan uygarlıkların günü-

müzdeki sayısını belirleyebiliriz. Şöyle bir benzetme yapabiliriz: Bir üniversiteye her yıl 6000 öğrenci başlasa ve bu öğrencilerin eğitimi ortalama 4 yıl sürse, herhangi bir anda toplam lisans öğrencisi sayısı $6000 \times 4 = 24.000$ olur. Drake bir adım daha ileri gidip her yıl ilk defa yayın yapmaya başlayan kaç uygarlığın ortaya çıktığını belirlemek için altı faktör geliştirdi. Buna göre, iletişim kuran uygarlıkların sayısı olan N , bu altı sayı ile ortalama yaşam süresi aşağıdaki gibi çarpılarak bulunabilir:

N uygarlıklar =

$$\underbrace{R_* \times f_{\text{gezegen}} \times n_{\text{yaşanabilir}} \times f_{\text{yaşam}} \times f_{\text{zekâ}} \times f_{\text{uygarlıklar}}}_{\text{her yıl iletişim kurmaya başlayan uygarlıkların sayısı}} \times \underbrace{L}_{\text{onların ortalama yaşam süresi}}$$

İşte bu, meşhur *Drake Denklemi*. İlk sayı olan R_* , yaşam barındırmaya müsait yıldızların doğum hızıdır. Astronomlar her yıl yaklaşık on adet G, K ve M tipi yıldız gözlemlerler. Diğer tüm faktörler aşağıdaki gibidir:

f_{gezegen} , gezegene sahip yıldızların oranı;

$n_{\text{yaşanabilir}}$, gezegen sistemi başına düşen yaşanabilir gezegen sayısının ortalaması;

$f_{\text{yaşam}}$, bu gezegenler arasında yaşamın ortaya çıkıp evrimleştiği gezegenlerin oranı;

$f_{\text{zekâ}}$, yaşanan dünyaların arasında akıllı yaşam geliştirme oranı;

$f_{\text{uygarlıklar}}$, bu dünyalar arasında yıldızlar arası iletişim gerçekleştirebilen uygarlıkların oranı;

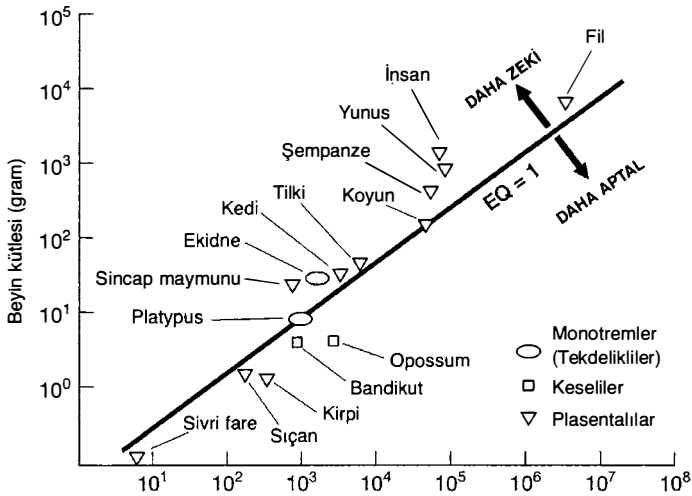
L , iletişim kurabilen bu uygarlıkların yaşam süresi.

Denklemdaki birkaç faktör bilinmiyor. Eh, ne olmuş yani? Biz yine de Drake Denklemi'ni kullanmayı deneyebiliriz. Günümüzdeki ötegezegen arayışları yıldızların en azından üçte ikisinin gezegen sahibi olduğuna işaret ediyor, o zaman f_{gezegen} 2/3 olacak.

Kepler görevinin analizi hâlâ sürüyor ama en azından her yüz gezegenden birinin yaşanılabilir olduğunu söyleyebiliriz, yani $n_{\text{yaşanabilir}} = 1/100$. Diğer parametreleriyse tahmin etmemiz gerekecek. Yaşam Dünya’da oldukça hızlı evrimleşti, bu yüzden yaşanabilir gezegenlerin yarısında yaşamın ortaya çıktığını varsayalım, yani $f_{\text{yaşam}} = 1/2$ olsun. Akıllı canlılar geliştiren biyosferlerin oranıysa $f_{\text{zekâ}} = 1/8$ olsun. Her on akıllı biyosferden birinin yıldızlar arası yayın yapabileceğini de varsayarsak, $f_{\text{uygarlıklar}} = 1/10$. Son olarak, iletişim kurabilen uygarlıkların yaşam ömrü sosyolojik bir spekülasyon olsa da, haydi ona da 10.000 yıl diyelim. Peki o zaman Samanyolu’nda kaç tane iletişim kurabilen uygarlık bulunur? Cevabımız dörtttür: $10 \times (2/3) \times (1/100) \times (1/2) \times (1/8) \times (1/10) \times 10,000 = 4$. Güzel. Olasılıkları daha da daraltabilir miyiz peki?

Ötegezegen çalışmaları eninde sonunda Drake Denklemi’deki ikinci ve üçüncü terimi netleştirecek ve biyoimzalar saptanabilirse yaşamın ortaya çıkma olasılığı ($f_{\text{yaşam}}$) hakkında da bize fikir verecektir. İyimserler sıvı su ve doğru malzemelerin bulunduğu bir gezegende yaşamın kolayca gelişeceğini düşünüyorlar. Şu anda bunun doğru olup olmadığını bilmiyoruz.

Diğer koşul ise zekâyla ilgili: Bu ne kadar mümkün? Bazı spesifik sorunların ancak bazı biyolojik çözümlerle halledilmesi, bununla ilişkili bir olgu olabilir. Zoolojide, akraba olmayan soylardan gelen organizmaların aynı özelliği paylaştığını sık sık görürüz, bu durum *yakınsak evrimin* bir sonucudur. Yakınsama, belirli işlevler ve ekolojik nişler için ortaya çıkar. Görme işlevi için en az kırk farklı hayvan grubunda gözler ortaya çıkmıştır. Bir köpeğin yaşamı yakınsak nişin bir örneğidir. Tazmanya kurdü (bir kesi) Meksika kurdü (plasentalı bir memeli) benzer köpekvari özellikler geliştirmiştir. Evrimsel yakınsamanın bu kadar yaygın olması, bacaklara, bir çift göze ve belirli ekolojilere sahip organizmaların kaçınılmaz olabileceği anlamına gelir çünkü yürüme, stereo görüş ve belirli nişlerde bulunma sorunlarının fiziksel çözümü yalnızca bunlardır.



Şekil 11. Bazı memelilerin beyin ve vücut kütleleri. Diyagonal çizginin solunda kalan hayvanların beyin kütleleri ortalama vücut kütlelerinden fazladır.

Teknolojik zekânın eşsiz mi yoksa yakınsak mı olduğu tartışmaya açıktır. Bu tür zekânın Dünya'da ortaya çıkışı yavaştı. Hayvan yaşamına yetecek oksijenin birikmesi için dört milyar yıl geçmesi gerekti. Teknolojik yaşam içinse birkaç yüz milyon yıl daha geçti. Dinozorlar yaklaşık 170 milyon yıl boyunca hüküm sürdüler ama geride teknolojiye dair hiçbir iz bırakmadılar. Ne fosil aletler ne de dinozor mikrodalga fırınları. Diğer yandan, beyinlerin değerli olduğu ve geliştiği soylar da vardı. Beyin kütlesi zekânın ölçümü için yeterli bir ölçüt değildir çünkü büyük bedenler genelde yönetilmek için büyük beyinlere ihtiyaç duyar. Bunun yerine Ensefalizasyon Oranı (EQ) adı verilen, bir hayvanın beyin kütlesinin aynı vücut kütlelerine sahip başka bir hayvanın ortalama beyin kütlesine oranına tekabül eden bir değer kullanılır. Ortalama bir hayvanın EQ değeri 1'e eşittir. Değeri 1'den büyük olanlar daha akıllı, 1'den küçük olanlar daha akılsızdır (Şekil 11). İnsanların EQ'su yaklaşık 7,4, şempanzelerininki ise 2,5'tir, bu da her iki-

sinin de beklenenden daha büyük beyinlere sahip oldukları anlamına gelir. Tavşanlar 0,4 EQ'ya sahiptir – Elmer Fudd'ın* hoşuna gidecek bir durum. Aristoteles'in de belirttiği gibi, “insan cüsesine oranla en büyük beyine sahiptir”.

Paleontologlar bazı soylarda zaman içinde EQ artışı olduğunu keşfettiler, bunların en başında da *Homo* cinsi geliyor. Örneğin 2 milyon yıl önce yaşayan bir hominin olan *Homo habilis*'in EQ'su yalnızca 4'tü. Dişli balinalarda (yunuslar, ispermeçet balinaları ve orkalar) EQ 35 milyon yıl önce arttı, bu da yiyecek ve arkadaşlarını bulmak için kullandıkları ekolojasyonun gelişimiyle aynı zamana denk geliyor. Buradaki anahtar kelime “arkadaşlar” olabilir. Sosyal hayvanlarda zekâ genellikle daha yüksektir, örneğin yunuslarda EQ 5,3'tür. Zekâ muhtemelen hayatta kalmaya ve eş bulmaya yardımcı olur, bu da daha fazla yeni nesil oluşmasını sağlar. Ancak zekânın ardında hangi evrimsel baskıların bulunduğu konusu hâlâ çok tartışmalı.

SETI ile ilgili son soru *Fermi paradoksu* olarak adlandırılır ve 1942'de dünyanın ilk nükleer reaktörünü inşa eden, Nobel ödüllü fizikçi Enrico Fermi (1901-54) tarafından ortaya atılmıştır. Bu fikir bir öğle yemeği sohbetinde ortaya atılmıştı. Samanyolu diskindeki yıldızlar dokuz milyar yıl önce ortaya çıkmışken Dünya yalnızca 4,5 milyar yaşındadır. Demek ki, eğer akıllı yaşam yaygınsa bizden önce çok sayıda teknolojik uygarlık ortaya çıkmış olmalı. Uzay yolculuğunu (veya onlar yerine uzay yolculuğu yapan kendini kopyalayabilen robotları) geliştirmiş olduklarını varsayarsak, şimdiye kadar tüm galaksiye yayılmış olmaları gerektirdi. “Nerede bunlar?” diye sormuştu Fermi.

Fermi paradoksunun üç çözümü var. Bunlardan biri, Drake Denklemi'ndeki bir faktör yok denecek kadar küçük olduğu için Samanyolu'nda yalnız olmamızdır. İkinci çözüme göre Fermi'nin

* *Looney Tunes* adlı çizgi dizide tavşan Bugs Bunny'nin baş düşmanı olan avcı. –y.n.

öncülü yanlıştır. Uygarlıkların etrafta dolaşıp diğer galaksileri sömürgeleştirmemesi için pek çok mantıklı neden vardır. Son olarak, uygarlıklar var olmalarına rağmen varlıklarını bizden (veya çoğumuzdan) gizliyor olabilirler. Biliminsanları özellikle üçüncü seçenekten hoşlanmazlar çünkü bu sınanamayan bir varsayımdır, ama bilimkurgu yazarları, günlük gazeteler ve (anketlere göre) Amerikalıların uzaylıların bizi ziyaret ettiğine inanan üçte birlik kesimi bu varsayımı pek sever. İlk iki seçenek mantıklıdır. Şurası açık ki, başka yerlerde yaşam bulmaya dönük çabaların tümü galakside yalnız olup olmadığımıza ve ilk çözüme bağlı. Eğer SETI başarılı olursa diğer uygarlıklara dair bilgi de edinebiliriz, tabii bu sinyalleri anlayabilirsek. Şu anda bildiğimiz tek yaşam buradaki yaşam, dolayısıyla biz de Fermi gibi “Nerede bunlar?” diye sormanın ötesine geçemiyoruz.

Tartışmalar ve Olasılıklar

Nadir Dünya Hipotezi

Astrobiyolojinin büyük, cevaplanmamış soruları tartışma yaratır. Seattle'daki Washington Üniversitesi'nden meslektaşlarım Peter Ward ve Don Brownlee, 2000 yılında *Rare Earth* (Nadir Dünya) adındaki çoksatarlarını yayımlayarak tartışmalara neden oldular. Esas olarak, *Nadir Dünya Hipotezi* Dünya üzerinde karmaşık yaşamın gelişmesini sağlayan cömert koşulların çok nadir görüldüğünü, bu yüzden de Dünya'nın Samanyolu'nda akıllı yaşama ev sahipliği yapan tek yer olabileceğini savunur. Ward ve Brownlee'nin öne sürdüğü argümanlardan bazıları şunlardı: Dünya'nın galakside doğru yerde bulunması; Güneş Sistemi'ndeki kuyrukluyıldızların Jüpiter tarafından yakalanması ve bu sayede Dünya'ya çarpmalarının önlenmesi; levha hareketleri sayesinde Dünya'nın yanıcı maddeleri sıradışı bir biçimde geridönüşümden geçirmesi; oksijen zengini bir atmosferin oluşumu için birçok koşulun bir araya gelmesi; Dünya'nın eksenini ve dolayısıyla iklimini dengede tutan büyük bir Ay'a sahip olması.

Nadir Dünya Hipotezi, *Kopernik İlkesi*'ni eleştiren bir polemikti. Adını (Güneş merkezli sistemini ortaya atarak evrenin mer-

kezinde olduğu düşünölen Dünya'yı tahtından eden) Nicolaus Copernicus'tan alan bu ilke, konumumuzun hiçbir biçimde özel olmadığını öne sürer. Astronomlar bu fikri destekleyen birkaç etken sayarlar. Birincisi, Dünya evrendeki pek çok kayalık gezegenden biridir. Dahası, G-tipi bir yıldız olan Güneşimiz de özel değildir çünkü evrendeki her on yıldızdan biri G tipidir. Galakside bulunduğumuz yer de –spiralin pek çok kolundan biri– sıradandır. Son olarak, galaksimiz de evrendeki pek çok gözlenebilir galaksinin arasında hiç de göze çarpmaz. Stephen Hawking'in ifadesiyle: "İnsan ırkı yüz milyar galaksinin dış çeperlerindeki gayet sıradan bir yıldızın etrafında dönen mütevazı ölçülerde bir gezegen üzerindeki kimyasal bir pisliktir yalnızca."

Kopernik İlkesi'nin savunucuları, bilimdeki büyük gelişmelerin özel olduğumuzu sanma yanılgısının saçmalığını nasıl açığa çıkardığına da dikkat çekerler. Galileo'nun *Sidereus Nuncius*'unu (Yıldız Habercisi, 1610) düşünmemiz yeterli. Galileo, Jüpiter'in uyduları ve Ay'ın yüzeyiyle ilgili gözlemlerini rapor ederek bu cisimlerin teolog filozofların varsaydığı cennetvari mükemmellikte olmadıklarını ve Dünya'da geçerli olan fizikle açıklanabileceklerini gösterdi. Benzer biçimde, Darwin'in *Türlerin Kökeni* de (1859) insanların biyolojik dünyanın geri kalanından ayrı bir yerde bulunduğu düşüncesini yerinden etti.

Nadir Dünya Hipotezi'nin sorunu, yaşama elverişli koşullara dair çok şey bildiğimizi varsaymasıdır, gerçekteyse pek çok şey belirsizdir. Örneğin yakın zamanlarda, yıldızların başıboş gezmesinin galaktik yaşanabilir bölgenin daha önce düşünöleninden daha az somut bir kavram olduğu anlamına geldiği keşfedildi. NASA'nın *Kepler* görevinin sonucunda, yıldızların etrafında gezegenlerin bulunmasının sık görölen bir durum olduğu, bu gezegenlerin arasında çok sayıda Jüpiter boyutunda gezegenin de bulunduğu göröldü. Tam da olması gereken yerde Jüpiter boyutunda bir gezegen bulunmasının kuyrukluyıldız veya asteroitlerin Dünya'ya çarpma oranını azalttığı argümanı da sorgulandı. Jüpiter'in Dün-

ya'ya çarpabilecek bazı cisimleri tıpkı kozmik bir elektrikli süpürge gibi ortadan kaldırdığına şüphe yok elbette. Shoemaker-Levy 9 kuyruklu yıldızı 1994'te Jüpiter'e çarptı; 2009 ve 2010'da da Jüpiter üzerinde başka çarpışmalardan geriye kalan izler gözlemlendi. Jüpiter'in Güneş Sistemi'ni 50.000 AU'luk mesafeden sarmalayan Oort Bulutu gibi bir buzlu cisimler kuşağından gelen kuyruklu yıldızları savuşturmaya veya uzaklaştırmaya yardımcı olduğu gayet iyi biliniyor. Fakat Dünya'ya çarpma tehlikesi olan cisimlerin yüzde 75'ini Dünya'ya yakın asteroitler ve Güneş Sistemi düzleminde gelen kuyruklu yıldızlar oluşturur ve Jüpiter bu cisimleri engellemek yerine istikrarsızlaştırabilir. Demek ki Jüpiter'in iki yüzü vardır. Bazı hesaplamalar Jüpiter'in aslında dosttan ziyade düşman olduğuna işaret eder.

Nadir Dünya'yı savunan diğer argümanlar da muğlaktır. Güneş Sistemi'nde Dünya'nın levha tektoniğinin eşi benzeri yoktur. Ne var ki, levha tektoniğine sahip olabilmek için bir gezegenin levhaları hareket ettirmeye yetecek içsel ısıya sahip olacak kadar büyük olması gerekir ve muhtemelen okyanus levhalarını soğutup hareketlerini kolaylaştıracak deniz suyuna ihtiyaç duyar. Güneş Sistemi'nde bu koşulları bir tek Dünya sağlar. Fakat bu, yaşanabilir bölgelerdeki ötegezegenlerin de benzer bir levha tektoniğine sahip olamayacağı anlamına gelmez.

Nadir Dünya Hipotezi, büyük bir uyduya sahip olmayan gezegenlerin Dünya'ya kıyasla daha fazla eksen eğikliği varyasyonuna sahip olacağını öne sürerken haklı olsa da, aşağı enlemlerdeki iklim varyasyonları aslında bir gezegen için faydalı olabilir. Aslına bakılırsa, bir ötegezegendeki atmosferin daha kalın, okyanusların daha büyük ve dönüş hızının daha düşük olması, değişken eğim yüzünden meydana gelen iklim farklılıklarının azalmasını sağlayabilir. Son olarak, diğer Dünya benzeri gezegenlerde oksijen birikiminin yokluğu sorunu da Nadir Dünya Hipotezi'nin varsayımlarına zıt yönde gelişebilir. Yanardağların püskürttüğü gazların arasında oksijenle tepkimeye girebilenlerin oranının düşük oldu-

ğu bazı gezegenler oksijen zengini atmosferler için Dünya'dan daha uygun olabilir. Bu gezegenlerde oksijen kolayca birikebilir.

Nadir Dünya Hipotezi'nin haklı görüldüğü noktaysa, mikrobiyal benzeri yaşamın akıllı yaşamdan çok daha yaygın olması gerektiğidir. Mikropların metabolizma aralığı muazzam bir genişliğe sahiptir ve karmaşık organizmalardan çok daha çeşitli çevrelerde yaşayabilirler. Fakat karmaşık yaşamın yaygınlığı konusunda nihai söylemler için yeterli verimiz olmadığından ötürü bu konuda şüpheli olmamız gerek. Carl Sagan'ın o meşhur sözünde belirttiği gibi: "Zihnin açık olması iyidir, ama içinden beynin düşeceği kadar da açık değil."

Dünyadışı Yaşam Arayışı İçin Astrobiyolojinin Gelecek Umutları

Astrobiyolojinin heyecan verici yönü, yaşamın kökeni ve evrende yalnız olup olmadığımız gibi soruları cevaplamaya çalışmasıdır. Teknolojideki gelişmelerle beraber, önümüzdeki on yıllarda büyük keşiflerin gerçekleşme ihtimali her geçen gün artıyor.

Erken dönemdeki yaşamı anlamaya yönelik çalışmalarda, laboratuvar ortamında kendini kopyalayabilen gerçeğe uygun genomların yapılma ihtimali yüksek. Bu da yaşamın kökenini çok daha iyi anlamamızı sağlayacaktır. Pek çok araştırmacı RNA Dünyası veya türevlerini araştırıyor. Güney Afrika ve Avustralya'daki yaşlı tortul kayaçların derinlerine ulaşmayı amaçlayan projelerin de erken dünya ve çevre konusunda yeni keşifler getireceği kesin.

Dünya'daki uzay ajanslarının Güneş Sistemi'ndeki en büyük önceliği Enceladus olmalı. Enceladus enerji kaynağına (gelgitsel ısınma), organik materyale ve sıvı suya sahiptir. Bu ise adeta ders kitaplarında sunulan "yaşam için gereken koşullar" listesine benzer. Dahası, Enceladus'ta organik materyalleri uzaya saçan püskürmeler de vardır. Bu püskürmelerdeki organik materyalleri incelemek üzere Enceladus'a gitmek için bir uzay aracı yapacak

teknolojiye kesinlikle sahibiz. Daha da iyisi, malzemeler analiz için Dünya'ya geri getirilebilir.

Aslına bakılırsa, dünyadışı örnekler toplayıp bunları Dünya'ya getirecek uzay araçlarıyla gerçekleştirilecek *numune getirme* görevleri, Mars ve Venüs'ün tarihini ve bu iki gezegende daha önceden yaşamın bulunup bulunmadığını anlamak için kilit önemdedir. Venüs'e yönelik bir numune getirme görevi ancak uzak gelecekte gerçekleştirilebilecekmiş gibi görünüyor, ama NASA ve ESA'nın şu anki planlarında Mars stratejik bir hedef teşkil ediyor.

Jüpiter'in çevresinde yaşam için en iyi hedef muhtemelen Europa'dır. İlk adım Europa'nın etrafında dönecek bir araç gönderip uyduyu detaylı bir şekilde inceleyerek yüzeyaltı okyanuslarının veya göllerinin üstündeki buzların kalınlığını belirlemek olacaktır. Bir sonraki adım, uygun araçlarla yüzeye iniş yapmak ve radyoaktif ısı jeneratörüne sahip robotlarla buzu eritmek olabilir. Nihayetinde Europa'nın okyanuslarına dalış yapan denizaltılar hayal etmek de mümkün.

Astrobiyolojinin Enceladus dışındaki hedeflerinden biri de Satürn'ün uydularından Titan'dır. Eğer bir çeşit gezegenler arası tekne, Titan'ın kutup bölgelerindeki göllere iniş yapıp bu organik sıvıların hangi maddelerden oluştuğunu bulabilirse, büyük bir bilimsel atılım gerçekleştirilmiş olur. Dahası, Titan'ın çevresindeki bir uydu da Titan'ın yüzeyaltı okyanuslarının derinliğini belirleyip uydunun yüzeyini inceleyebilir.

Geleceğe dair kesin olan bir şey varsa o da ötegezegen keşiflerinin astrobiyolojeye dönük ilgi uyandırmaya devam edecek olmasıdır. Diğer yıldızların yaşanabilir bölgelerinde pek çok Dünya benzeri gezegen, neredeyse saf karbondioksitten oluşan atmosferlere sahip ölü gezegenler, tamamen okyanuslarla kaplı su dünyaları ve kontrolden çıkmış sera etkileriyle okyanuslarını uzaya saçan genç Venüs benzeri gezegenler keşfedileceğini öngörüyorum.

1990'larda astrobiyoloji bir disiplin olarak ortaya çıktığında bazıları onun geleceğini sorguladı ve sönüp gidecek bir moda ol-

duđunu dűŖűndű. Bunun sebebi belki de dűnyadıŖı yaŖamın abu-
cak bulunamamasının veya yaŖamın kűkeni hakkındaki soruların
yanıtlanamamasının yarattığı hayal kırıklığıydı. YaŖanabilir bűl-
gelerde bulunan Dűnya boyutundaki űtegezegenlerin keŖfi dűnya-
dıŖı yaŖam ihtimalini her zamankinden daha gűncel hale getiriyor.
Astrobiyolojinin bir yere gitmeye niyeti yok.

—

Görseller Hakkında

1. Hertzsprung-Russell diyagramı

Şu kaynaktan uyarlanmış ve Profesör Robert Carneiro'nun izniyle kullanılmıştır: "Stellar Evolution and Social Evolution: A Study in Parallel Processes" (2005), *Social Evolution and History* 4:1, s. 136-59.

2. *Sol*: Dünyanın en eski fosil stromatolitlerinin kesit görüntüsü. Sağ: Stromatolit yatağının kuşbakışı görünümü. Fotoğraflar: David C. Catling.

3. Atmosfer'deki oksijenin yaklaşık tarihi. Yazarın kendi diyagramı.

4. a) Prokaryot (arke ve bakteri) ve ökaryot yapılarının şematik karşılaştırması; b) Konjugasyon yapan iki bakteri (fotoğraf: Charles C. Brinton Jr. ve Judith Carnahan).

5. *Sol*: DNA birbirine bağlı iki zincirden oluşur. Sağ: Üç boyutta her bir zincir sarmal biçimindedir, şeklin bütünü "ikili sarmal" olarak adlandırılır.

6. Karasal yaşam metabolizmalarının sınıflandırılma şeması.

7. Ribozomal DNA ile oluşturulmuş "yaşam ağacı".

8. a) Mars'taki vadi ağları (ESA/DLR/FU Berlin [G. Neukum]); b) Ravi Vallis taşkın kanalı (NASA/JPL/Caltech/Arizona Devlet Üniversitesi).

9. Jüpiter'in Galileo uyduları: Io, Europa, Ganymede ve Callisto (NASA/JPL/DLR).

10. a) Huygens iniş bölgesi yakınlarındaki bir düzlüğe akıyor gibi görünen bir kanal ağı; b) Huygens iniş bölgesinin yüzey görüntüsü (ESA/NASA/Arizona Üniversitesi).

11. Bazı memelilerin beyin ve vücut kütleleri. Şu kaynaktan uyarlanmıştır: *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology*, 136:4, Hassiotis, M., Paxinos, G. ve Ashwell, K. W. S., "The Anatomy of the Cerebral Cortex of the Echidna (*Tachyglossus aculeatus*)", s. 827-50. Copyright (2003), Elsevier'in izniyle.

Ek Kaynaklar

1. Astrobiyoloji Nedir?

Aşağıdaki ders kitaplarında astrobiyolojiye giriş çok daha geniş biçimde işleniyor:

Bennett, J. O. ve Shostak G. S., *Life in the Universe*, San Francisco: Pearson Addison-Wesley, 2012.

Rothery, D. A. ve diğ., *An Introduction to Astrobiology*, Cambridge: Cambridge University Press, 2011.

Plaxco, K. W. ve Gross, M., *Astrobiology: A Brief Introduction*, Baltimore: Johns Hopkins University Press, 2011.

Lunine, J. I., *Astrobiology: A Multidisciplinary Approach*, San Francisco: Pearson Addison Wesley, 2005.

Sullivan, W. T. ve Baross, J. A. (haz.), *Planets and Life: The Emerging Science of Astrobiology*, Cambridge: Cambridge University Press, 2007.

1950'ler ve sonrasında astrobiyolojinin gelişimi için: Dick, S. J. ve Strick, J. E., *The Living Universe: NASA and the Development of Astrobiology*, New Brunswick, NJ: Rutgers University Press, 2004.

Yaşamın doğası üzerine eski bir klasik: Schrödinger, E., *Yaşam Nedir?*, çev. Celal Kapkın, Evrim, 1999.

2. Yıldız Tozundan, Yaşama Ev Sahipliği Yapan Gezegenlere

Modern Büyük Patlama teorisinin okunaklı bir tartışması için: Lineweaver, C. ve Davis, T., "Misconceptions about the Big Bang", *Scientific American*, 292: 36-45, 2005.

Arthur Holmes'un Dünya'nın yaşını bulma çabasının hikâyesi: Lewis, C., *The Dating Game: One Man's Search for the Age of the Earth*, Cambridge: Cambridge University Press, 2012.

3. Yaşamın ve Çevrenin Kökenleri

Yaşamın kökeni bilimi şu kitapta anlatılıyor: Hazen, R. M., *Genesis: The Scientific Quest for Life's Origin*, Washington, DC: Joseph Henry Press, 2005.

Dünya'nın erken dönem evriminin kolay anlaşılır bir açıklaması: Knoll, A. H., *Life on a Young Planet: The First Three Billion Years of Evolution on Earth*, Princeton: Princeton University Press, 2003.

4. Çamurdan Yüceye

Dünya'nın oluşumu, evrimi ve yaşanabilirliği şu kitapta anlatılıyor: Langmuir, C. H. ve Broecker, W. S., *How to Build a Habitable Planet: The Story of Earth from the Big Bang to Humankind*, Princeton: Princeton University Press, 2012.

5. Yaşam: Bir Genomun Daha Fazla ve Uyum Başarısı Daha Yüksek Genomlar Oluşturmasının Yolu

Modern mikrobiyolojide yaygın biçimde kullanılan giriş seviyesinde bir ders kitabı: Madigan, M. T. ve diğ., *Brock Biology of Microorganisms*, San Francisco: Benjamin Cummings, 2012.

Dünya'nın kimyasının küresel seviyedeki etkileri şu ders kitabında anlatılıyor: Schlesinger, W. H. ve Bernhardt, E. S., *Biogeochemistry: An Analysis of Global Change* (3. Baskı), San Diego: Academic Press, 2013.

6. Güneş Sistemi'nde Yaşam

Güneş Sistemi'ndeki gezegenler ve bunların yaşanabilirlikleri şu ders kitabında anlatılıyor: Lissauer, J. J. ve de Pater, I., *Fundamental Planetary Science: Physics, Chemistry and Habitability*, Cambridge: Cambridge University Press, 2013.

7. Uzak Dünyalar, Uzak Güneşler

Yaşanabilir ötegezegenler arayışını anlatan okunaklı bir kitap: Kasting, J. F., *How to Find a Habitable Planet*, Princeton: Princeton University Press, 2010.

8. Tartışmalar ve Olasılıklar

Karmaşık yaşamın az görülmesi üzerine tartışma yaratan ama çok ilgi çekici bir kitap: P. D. Ward, D. Brownlee, *Rare Earth: Why Complex Life is Uncommon in the Universe*, New York: Copernicus, 2000.

- adaptif optik, 131
Aldebaran (yıldız), 29
ALH84001 meteoriti, 113
Alpha-Centauri B, 129
alterasyon mineralleri, 108
amino asitler, 45, 46, 85, 90
anakol, 31-32
Andromeda galaksisi, 26
anti-biyomizmalar, 138
Aristoteles, 13-14
arkeler, 80-83, 90, 92-93, 95-96
asteroit çarpması, 12, 36, 75, 111, 145-46
astrobiyolojinin tanımı, 11-13, 15
astrometri, 128
atmosfer, 99-100
 Dünya'da, 44-45, 57-66-68, 137-38, 144
 Mars'ta, 99, 100, 104-5, 109-13
 ötegezegenlerde, 73, 135-37
 Plüton'da, 125
 Titan'da (Satürn'ün uydusu), 119-20
 Triton'da (Neptün'ün uydusu), 124
 Venüs'te, 99-103
ATP (adenozin trifosfat), 47
Ay, 25, 38-39, 40, 42
bakteri konjugasyonu, 81, 83
bakteriler, 80-83, 89-90, 93-96, 114
Bernal, J. Desmond, 16
Betelgeuse, 30
beyaz cüceler, 30-31
biyoastronomi, 16
biyobelirteçler, 55-56, 67
biyomizmalar, 136-37
biyokütle, 63, 77-78, 115, 118-19, 125
biyomoleküller, 49, 50, 85, 88
biyosfer, 72, 74, 77-79, 133, 137
Brasier, Martin, 55
Brock, Thomas, 94
Brownlee, Don, 144
Budyko, Mikhail, 70
Buick, Roger, 52
buz devleri, 35
buz volkanları, 124
buzullaşma, 69-71
Büyük Patlama, 27-28, 153
Callisto (Jüpiter'in uydusu), 98, 116, 118-19, 151
Cassini-Huygens görevi, 120
Ceres (en büyük asteroid), 98, 115
Charon (Plüton'un uydusu), 125
Chiron, 42
Chyba, Christopher, 19
Cleland, Carol, 19
Cocconi, Guiseppe, 138
Cosmotheoros (Huygens), 14
Crick, Francis, 86

Curiosity Rover, 104-5

çoğulculuk, 13

daimi yaşanabilir bölge, 133

damlataşlar, 69

Darwin, Charles, 19, 43-44, 145

Dawn görevi, 115

demir, 30-31, 63-64

Demokritos, 13

dev gezegenler, 35-36, 42, 43, 129, 135

DNA, 21, 45, 48-49, 51, 63, 80-81, 83-87, 90-91, 92-93

DNA dizileme, 92

doğal seçim, 19, 90

Doppler kayması, 128-30

Drake Denklemi, 139-40, 142

Drake, Frank, 138

Dünya, 99

akıllı yaşamın gelişmesi, 141, 143

kitlesel yok oluşlar, 73-76

yaşamın kökeni, 12, 16, 43-56

yaşı, 37-38

Dünya'nın yaşı, 37-38

dünyadışı akıllı varlık arayışı (SETI), 138-43

Edikara biyotası, 67-68

Einstein, Albert, 130

ekstremofiller, 94-96

ekzobiyooloji, 15-16

Enceladus (Satürn'ün uydusu), 98, 119, 147-48

endosimbioz, 83

Ensefalizasyon Oranı (EQ), 141-42

entropi, 17-18

Europa (Jüpiter'in uydusu), 13, 23-24, 79, 89, 96, 98, 116-18, 125, 148

evrenin genişlemesi, 27-28

evrim, 16, 19, 63, 66, 72-74, 82, 86, 89-90

Fanerozoik Devir, 68, 75

Fermi paradoksu, 142

Fermi, Enrico, 142-43

filojeni, 91-94

fosiller, 52-56, 62, 67, 73-74, 93-94, 103

fotosentez, 32, 44, 52, 62-64, 73, 78, 82, 89

G tipi yıldızlar, 32, 145

galaksiler, 26-28

galaktik yaşanabilir bölge (GYB), 135-36

Galileo uyduları (Jüpiter), 116

Galileo uzay aracı, 13, 117, 137

Galileo, 116, 145

gametler, 83-84

Ganymede (Jüpiter'in uydusu), 98, 116-20, 122

gaz devleri, 35, 79

Geç Dönem Ağır Bombardıman, 42, 52

geçiş yöntemi, 130, 132

gelgitsel ısınma, 116-19, 124-25, 147

gelgitsel kilitlenme, 134-35

gen transferleri, 92

Genel Görelilik Teorisi, 130

genetik, 89-94

genomlar, 19, 92

gezegen embriyoları, 35

gezegen göçü, 36, 129

gezegenimsi nebularlar, 30

Güneş, 25-26, 57-58

elementler, 29-30

yaşam döngüsü, 30-32

güneş akısı, 99-101

Güneş Sistemi, 26

gezegen yörüngeleri, 42-43

oluşumu, 33-36

yaşı, 37

Hadeyan devri, 40-42, 45, 47, 61

Haldane, J. B. S., 44-45

Hawking, Stephen, 145

helyum, 21, 28-30, 32, 35, 57, 136
 Herrmann, Joachim, 15
 Hertzsprung-Russell diyagramı, 31-32
 hidrojen, 28, 32, 66, 102
 hidrotermal bacalar, 46, 48, 55, 89, 115
 Holmes, Arthur, 37
 homokiralite, 51
 Hooker, Joseph, 43
 Hubble, Edwin, 127
 Huntress, Wes, 15
Huygens görevi, 120-21
 Huygens, Christiaan, 14
 hücreler, 72, 80-84, 93
 Io (Jüpiter'in uydusu), 116-17
 ilksel çorba, 45
 interferometri, 132
 izotoplar, 33-34, 37-38
 Jüpiter, 35-36, 42-43, 79, 116
 K yıldızları, 134
 Kambriyen Patlaması, 68, 73-74
 Kant, Immanuel, 14, 33
 kara cüceler, 30
 kara delikler, 32
 karbon temelli yaşam, 20-21, 23
 karbonat-silikat döngüsü, 60-61
 karbonhidratlar, 23, 85, 92
 Kartopu Dünya hipotezi, 69-71
 kayalık gezegenler, 32, 35, 145
 Kelvin ölçeği, 31
 kemiozmoz, 47-48
 kemoheterotroflar, 88-89
Kepler görevi, 130, 140, 145
 Kepler, Johannes, 14
 kırmızı cüceler, 31-32, 123
 kırmızı devler, 29, 31-32, 73, 134
 kırmızı süperdevler, 30
 kızılötesi ışıma, 58-59, 101-2, 108, 131-32, 135

kimyasal ayrışma, 60, 108
 kimyasal elementler, 20, 79
 kiralite, 49-51
 Kirschvink, Joe, 70
 Klein, Harold, 113
 klor, 72
 kontrolden çıkmış sera etkisi, 101-2, 134-35
 Kopernik İlkesi, 144-45
 koronograf, 131
Kozmik Bağlantı (Carl Sagan), 24
 Kozmik Mikrodalga Arkaplanı, 27
 kozmobiyojoloji, 16
 Kretase-Paleosen kitlesel yok oluşu, 75-76
 kromozomlar, 84
 Kuiper Kuşağı Cisimleri, 123, 125-26
 kurşun izotopları, 37-38
 Lafleur, Laurence, 15
 Laplace rezonansı, 117
 Laplace, Simon-Pierre, 33
 Lederberg, Joshua, 15-16
 levha tektoniği, 61, 146
 Linnaeus, Carolus, 80
 lipitler, 85, 92-93
 Lowell, Percival, 14-15
 M cüceleri, 134-35
 MacGregor, Alexander, 44
 magnezyum-26 atomları, 34
 manyetik alan, 69-70, 114, 117, 118
 manyetit, 69, 113-15
Mariner görevleri, 103
 Mars, 12, 14-15, 99-100, 103-15, 134
 Mayor, Michel, 129
 Merkür, 35, 98, 99-100, 116, 120, 134
 mesajcı RNA (mRNA), 86-87
 metabolizma, 16, 19, 22, 48, 49, 72, 79, 85, 87-88, 147
 metan, 35, 59-60, 71, 105
 meteoritler, 34, 36-38, 43, 113-14
 mikrofosiller, 54-56, 113-14

mikromerceklemeler, 128, 130, 131
mikroplar, 12-13, 23
Miller-Urey deneyi, 45
Miller, Stanley, 44-45
Mitchell, Peter, 48
moleküler saatler, 93
Morrison, Philip, 138
Murchison meteoriti, 46

Nadir Dünya Hipotezi, 14, 144-47
Nazca levhası, 60
nebula hipotezi, 34, 36
negatif entropi, 18
Neoproterozoik buzullaşma, 69-71
Neptün, 15, 19, 24, 30, 106-8
nötronlar, 30-31, 34
numune getirme görevleri, 148
nükleer füzyon, 29, 30, 32, 57
nükleotitler, 85-87, 90, 91, 122

Of the Plurality of Worlds (Whewell),
14
oksijen, 44, 61-66, 68-69, 72-73, 118,
146-47
oksijenlenme zamanı, 73
Oort Bulutu, 146
Oparin Alexander, 44, 45
organik karbon, 21, 45-46, 48, 54-55,
64, 68, 88
organik moleküller, 21, 28, 43-45, 47,
48, 51, 55, 79, 85, 112, 119
ozon tabakası, 65, 75, 104

ökaryotlar, 73, 80, 82-84, 91, 95
ötegezegenler, 13, 36, 73, 76, 82, 89,
123, 127-44

PAH'lar (polisiklik aromatik hidrokar-
bonlar), 113-14
Paleoproterozoik buzullaşmalar,
69-71
panspermia, 43
Patterson, Clair, 37-38

Pauling, Linus, 18-19, 73
Permiyen-Triyas kitlesel yok oluşu, 75
Platon, 13-14
Plütön, 97, 98, 123, 125-26
prokaryotlar, 80-82, 91
protein sentezi, 91
proteinler, 20, 23, 28, 44-45, 48-49,
51, 82, 85-87, 90-93
Proterozoik Devir, 69-72
proton gradyanı, 47
Proxima Centauri, 26

Queloz, Didier, 129

radyoaktif izotoplar, 37-38, 118
radyojenik ısı, 118-19, 124-25
ribozomlar, 81, 82, 87, 90-91
RNA, 48-49, 51, 84-87, 90-92
RNA Dünyası, 48, 51, 147

Sagan, Carl, 24, 25, 147
Samanyolu Galaksisi, 26, 27, 33, 135,
140, 142, 144
Satürn, 23, 34, 35, 42, 97-98, 119-22,
126, 128, 148
Schiaparelli, Giovanni, 14
Schneider, Eric, 18
Schopf, Bill, 55
Schrödinger, Erwin, 18-19
senkronize rotasyon, 134
sera etkisi, 58-60, 70, 71, 99-102, 134
Shapley, Harlow, 133
sıcak Jüpiterler, 36, 127, 130, 137
"sıkıcı milyar", 67-69
Simpson, George Gaylord, 16
siyanobakteriler, 55-56, 62-64, 82, 83,
89, 91
soluk genç Güneş paradoksu, 57-58
stromatolitler, 52-54, 63-64
Struve, Otto, 15
Sukuşığı Dünya, 69, 71
Süper Dünyalar, 127, 136
süpernovalar, 30-34, 136

taksonomik seviyeler, 80
 teknoimzalar, 138
 Termodinamiğin İkinci Yasası, 17
 termodinamik, 17, 18
 termofiller, 41-42, 93, 94-96
 Thales, 13
 Theia, 38
 Tikov, Gavriil, 15
 tillitler, 69
 Titan (Satürn'ün uydusu), 23, 97-98,
 119-20, 122-23, 125, 135, 148
 tortul kayalar, 37, 40, 44, 52, 54, 58,
 63, 65, 104, 147
 transkripsiyon, 86
 Triton (Neptün'ün uydusu), 98, 123-25
 "tuhaf yaşam", 97, 122-23

 Uranüs, 34, 35, 42, 126
 uranyum izotopları, 37
 Urey, Harold, 44
 uyumlu enerji, 17

 Venüs, 34, 35, 79, 98-103, 137-38,
 148
Viking uzay araçları, 19, 103, 111-13

Virgo süperkümesi, 27
 virüsler, 83, 84
 volkanlar, 45, 60
 Vostok Gölü, Antarktika, 96
Voyager 1 uzay aracı, 136-37

 Ward, Peter, 144
 Watson, James, 86
 Whewell, William, 14, 33
 Woese, Carl, 90-92

 yakınsak evrim, 140
 yarı ömür, 34, 37
 yaşam ağacı, 89-94
 yaşamsal elementler, 20-11, 23, 104,
 118
 yaşanabilir bölge (YB), 133-35
 yayın yapan uygarlıklar, 138
 yıldırım, 44
 yıldızlar, yaşam döngüsü, 29-33
 yüzeyaltı biyosferi, 78

 zirkonlar, 41, 61
 Zuckerkandl, Emile, 93

İnsanlar çok eski zamanlardan beri yeryüzünde yaşamın nasıl ortaya çıktığı ve evrende yalnız olup olmadığımız gibi sorulara kafa yoruyorlar. Son dönemlerde adını giderek daha sık duyduğumuz astrobiyoloji tam da bu sorulara yanıt bulmak üzere ortaya çıkmış bir bilgi alanı. Evrende ve dünyada yaşamın kökenini, evrimini ve geleceğini inceleyen astrobiyologlar, gelişen teknolojiyle birlikte her geçen gün hayal gücümüzü kışkırtan keşiflerde bulunuyor.

Kendisi de bir astrobiyolog olan David Catling bu kitapta astrobiyolojinin temel meselelerini ele alarak bu heyecan verici bilime dair kısa ama kapsamlı bir çerçeve sunuyor. Dünyada yaşamı ortaya çıkaran koşullar nelerdi? Yaşam hangi ilkeler temelinde gelişti? Gezegenimiz mevcut haline erişmeden önce nasıl evrelerden geçti? Kitlesel yok oluşlara hangi olaylar yol açtı? Dünyamızı nasıl bir gelecek bekliyor? Gezegenler nasıl oluştu? Güneş Sistemi'nde ve ötesinde hangi gezegenlerde yaşam ortaya çıkmış olabilir veya gelecekte ortaya çıkabilir? Dünya dışındaki bir gezegende akıllı varlıklar varsa –fizikçi Enrico Fermi'nin meşhur tabiriyle– “Nerede bunlar?”

Astrobiyoloji, okuru kendi tanıdık dünyasından dışarı adım atıp üzerinde yaşadığı görkemli gezegene ve çevresini sarmalayan uçsuz bucaksız evrene meraklı gözlerle bakmaya davet ediyor.



Metis Bilim

ISBN-13: 978-605-316-149-3



Metis Yayınları
www.metiskitap.com