

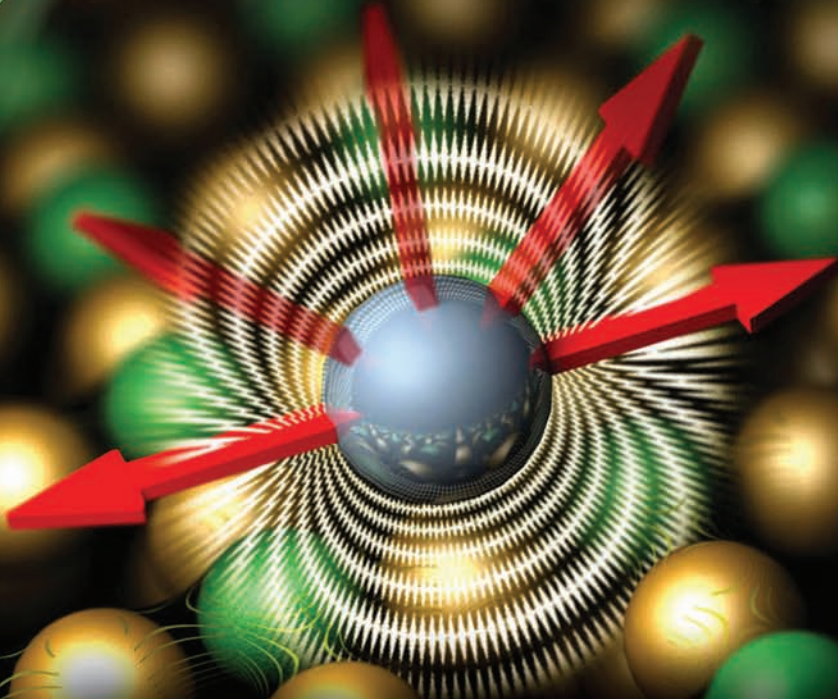
AYLIK POPÜLER BİLİM DERGİSİ

# BİLİM ve TEKNİK



TÜBİTAK

## YENİ UFUKLAR



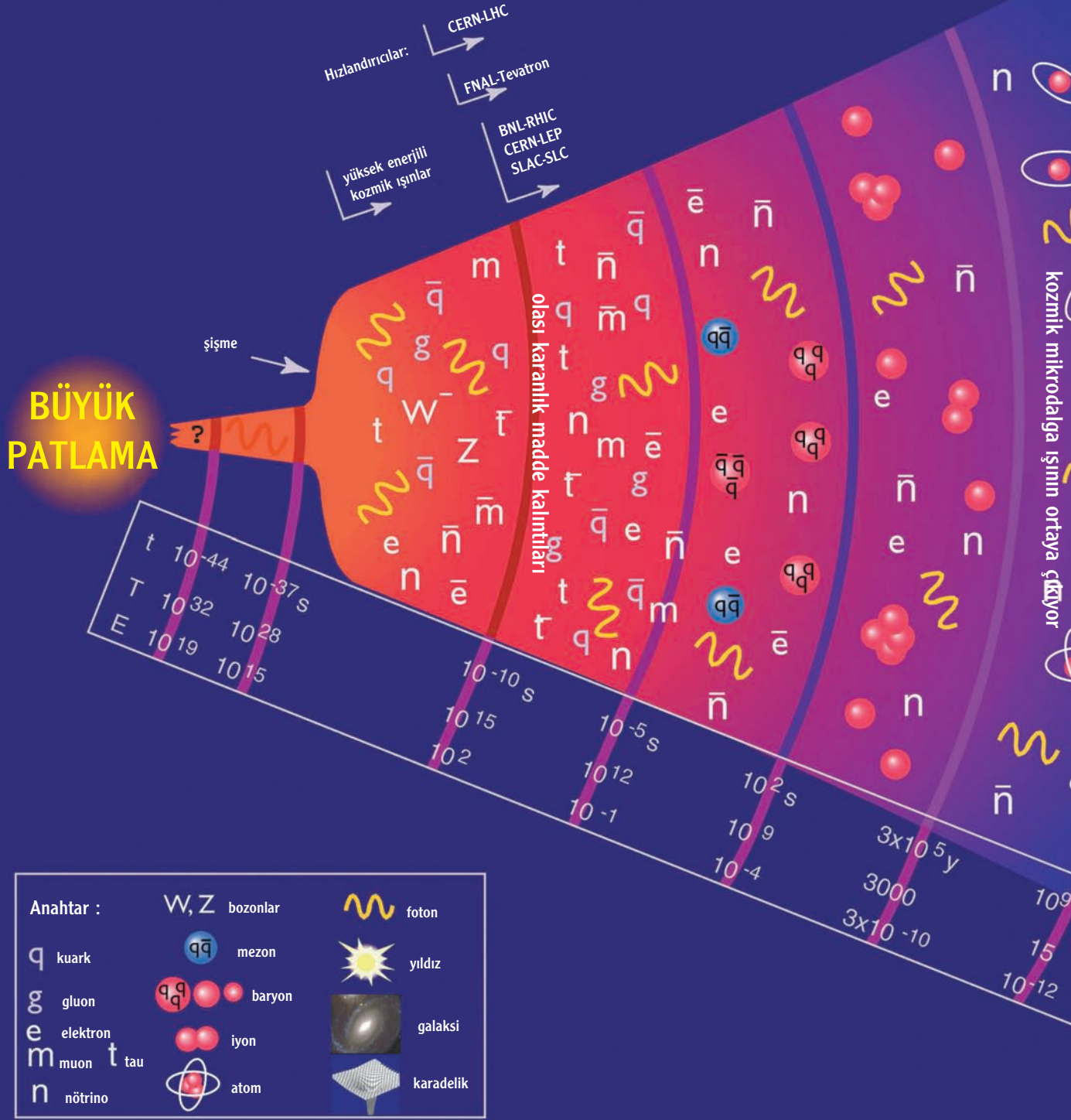
## ELEMENTLERİN OLUŞUMU

MART 2008 SAYISININ PARASIZ EKİDİR

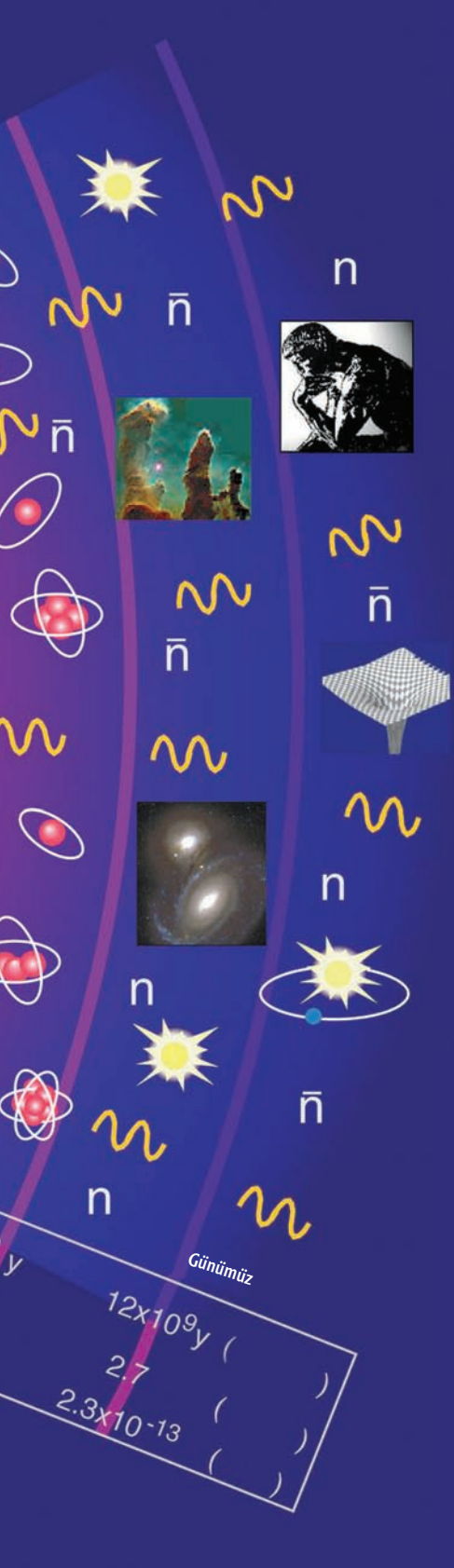
Hazırlayan: Prof. Dr. Vural Altın

# ELEMENTLER

## Evrenin Tarihi



# İN OLUŞUMU



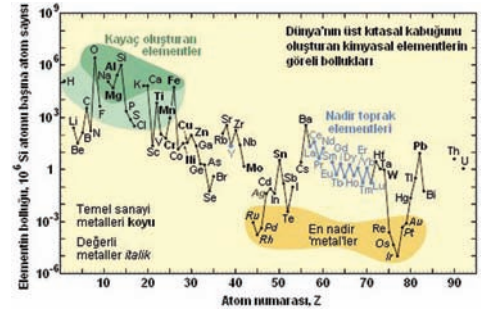
Hücre yapısının kütlece %65-90'ı sudan oluşuyor; iki hidrojen, bir oksijen. Karbon, organik yaşamın belkemiği. Oksijen soluyoruz, ağırlığımızın %65'i oksijen. Dünyada yılda 1 milyar ton demir cevheri üretilmekte. Altın çok pahalı bir metal, uranyum nükleer yakıt olarak kullanılıyor: Nasıl oluşmuş bu elementler? Nereden gelmişler?

Bu sorunun yanıtını aramak üzere yola çıkarken, önce elementlerin doğadaki bolluk oranlarına, en yakınımızdan başlayarak bir göz atmakta yarar var. Tarihsel süreç de böyleydi zaten. Bolluk oranını, sayısal oran veya kütle oranı olmak üzere, iki şekilde belirtmek mümkün. Bu ikisi, atomların kütle farkından dolayı aynı olmuyor. Örneğin, sudaki hidrojenin oksijene oranla bolluğu; sayısal olarak 2'ye 1 lehine iken, kütleli olarak aleyhinedir. Aksi belirtilmedikçe, oranlar sayısal...

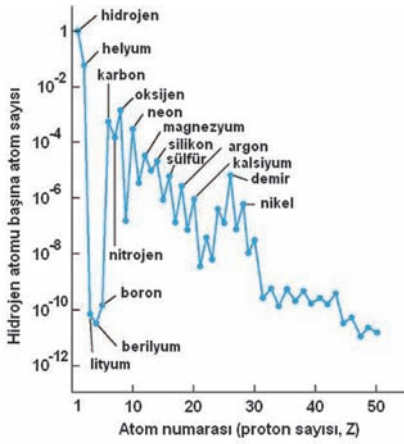
Yerkabuğunun üst kısmını oluşturan elementler arasında, hidrojen bol. Atom numarası arttıkça; önce azalma, sonra çoğalma var. Lityum, berilyum ve bor; oldukça nadir. En bol elementler, oksijen ve silikon. Tevekkeli, kabuk çoğunlukla silikat kayalardan oluşmakta. Sonra karbon ve demir geliyor. Yılda 1 milyar ton demir cevheri bu sayede üretilmekte. 'Nadir' toprak elementleri, aslında nadir değil; krom, nikel, bakır gibi çokça üretilen sanayi metallere bile bol. En düşük oranlı tulyum ve lutesyum dahi, altından 200 misli daha fazla. Bolluk oranlarının grafiğinde, asal gazlar görülmüyor. Bunun nedeni, yörünge kabukları dolu olduğundan, kimyasal tepkimelere girmeye eğilimlerinin olmaması. Atmosferde olmaları lazım. Yerkabuğunda sadece, ağır radyoaktif elementlerin bozunmasıyla, eser miktarlarda oluşuyorlar.

Okyanus suları ve atmosferdeki oranlar, kabuğunkinden farklı. Oksijen, bu ikisinde de bol. Kimyasal tepkimelere girmeye çok meraklı olan bu elementin atmosferdeki varlığı, yaşam süreçlerinin bir sonucu; fotosentezle sürekli üretiliyor olması. Aksi halde, bir zamanlar olmadığı gibi, atmosferde bulunmazdı. Hidrojen, yeryüzünün aksine, atmosferde çok az. Bunun nedeni, elementlerin en hafifi olduğundan, dünyanın oluşumu sırasında hakim olan yüksek sıcaklıklarda, yerçekiminden kurtulacak hızlara ulaşmış olması.

Bu oranlar canlı organizmaların kimyasal bileşimiyle kıyaslandığında, yaşamın elementler tablosundan kendine uygun olanları çekip kullandığı açık. Örneğin insan vücudunun kütlece %99'u sadece altı elementten; oksijen, karbon, hidrojen, nitrojen, kalsiyum ve fosfordan oluşuyor.



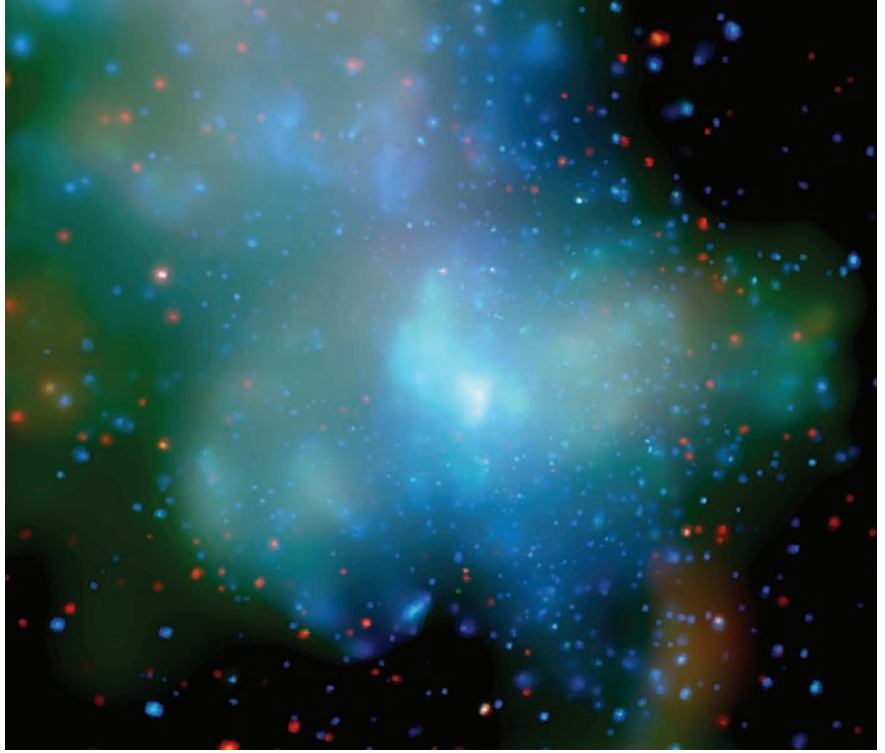
Dünya elementlerin dağılımı açısından, genelini temsili değil. Ne de olsa kayalık bir gezegen. Jüpiter ve Saturn gibi gaz devlerinde durum farklı. Güneş'te ve diğer yıldızlarda da öyle. Nitelikim, gök cisimlerinin ışımaya tayflarına bakılıp yüzey sıcaklıkları, tayftaki soğurma çizgilerinden hareketle de kimyasal bileşimleri belirlenebilmekte. Gökadamız Samanyolu bu tekniklerle incelendiğinde, görülen manzara şöyle: Hidrojenin bolluk oranı, açık ara önde. Sonra helyum geliyor. Lityum, berilyum ve boronda, yine açık bir düşüş



Elementlerin Samanyolu'nda gözlemlenen bolluk oranları

© 2005 Pearson Education, Inc., publishing as Addison Wesley

var. Dağılımın bundan sonraki genel



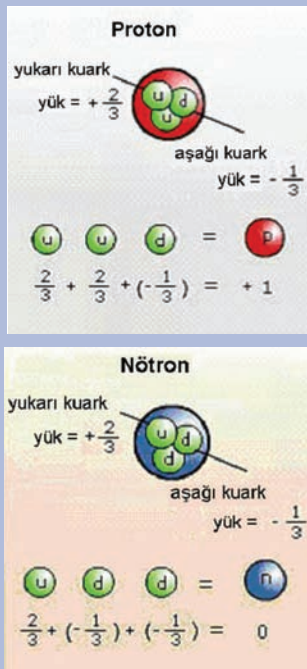
özelligi, atom numarası arttıkça bolluk oranlarının azalması. Yalnız, proton sayısı çift olan elementler, tek sayılı bitişik komşularından daha bol. Diğer gökadamalar da incelendiğinde, benzer dağılımlar elde ediliyor. Sonuç; evrenin kütlece %75'i hidrojen, %23 kadarı helyumdan oluşmakta. Gökbilimciler hidrojen ve helyumdan daha ağır olan elementleri 'metal' olarak nitelendirirler. Tüm metallerin, yani doğadaki, hidrojen ve helyum dışındaki 90 elementin toplam bolluğu %2'den az. Bu durum, evrendeki hammaddenin hidrojen ve helyum çekirdekleri olduğu

na, diğer elementlerin bu çekirdeklerin kaynaşmasıyla oluştuğuna işaret ediyor. Hatta helyumun da hidrojen-den... Bu nasıl olur?

İki hidrojeni, çekirdeklerini kaynaştırmak amacıyla birbirine yaklaştırmaya çalıştığımızda, elektronları birbirini iter. Bu engeli atomları ısıtıp iyonlaştırmak suretiyle aradan kaldırmak, görece kolay. Gereken sıcaklıklar 5-6 bin Kelvin düzeyinde ve dünyamızda bu sıcaklıklar, belki bir zamanlar vardı. Ancak, çıplak protonları dahi birbirine yaklaştırmak için, artı yükleri birbirini ittiğinden, üzerlerinde kuvvet uygula-

## Çekirdeğin Yapısı

Atomun çekirdeği, proton ve nötronlardan oluşan, karmaşık bir iç yapıya sahip. Proton ve nötronun da, 'kuark' denilen altı çeşit temel parçacığın iki türünün üçlülerinden oluşan, farklı birer iç yapısı var. Şöyle ki; proton 2 'yukarı' ('up', u) kuark ile 1 'aşağı' ('down', d) kuarktan, nötron ise 2 'aşağı kuark' ile 1 'yukarı kuark'tan oluşur. Protonlar ve nötronlar, iç yapıları nedeniyle, 'temel parçacık' sayılmaz. Fakat çekirdeğin yapıtaşlarını oluşturduklarından, 'çekirdekçik' ('nükleon') olarak da anılırlar.



Elektronun ise bilindiği kadarıyla, tıpkı kuarkların olmadığı gibi, iç yapısı yok. Bu yüzden, 'temel parçacık' olarak nitelendirilir.

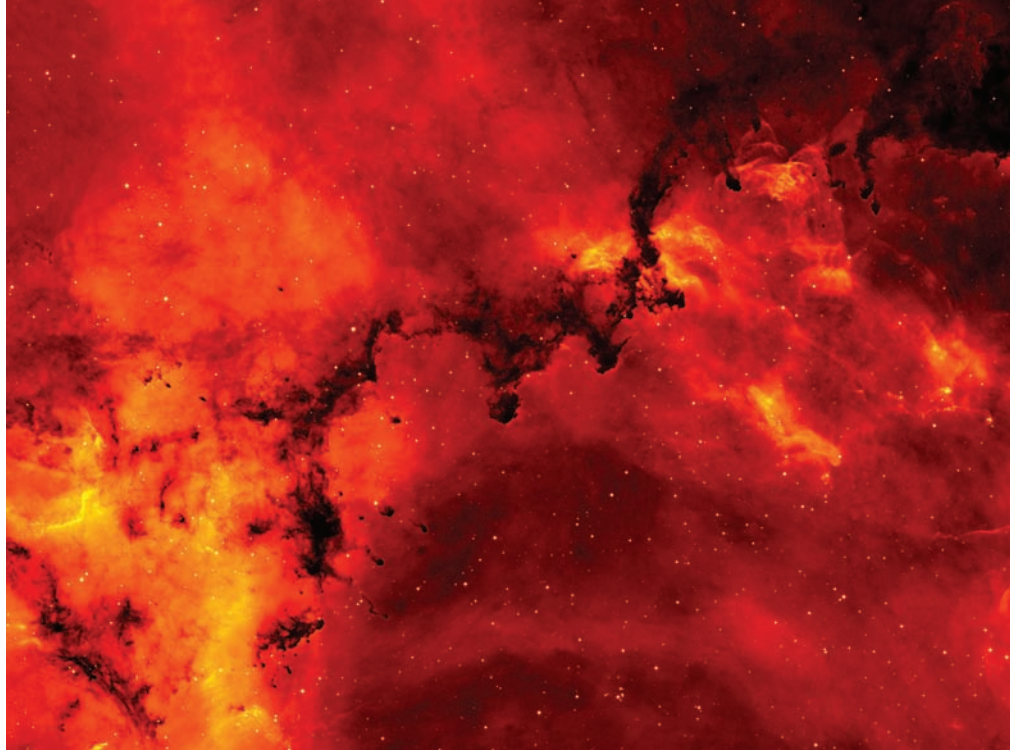
Bizim büyük ölçekli dünyamızdaki cisimler, bazı özelliklerine göre; örneğin taş, ağaç veya insan olarak sınıflandırılır. Fakat, aynı türden cisimler arasında bile; örneğin boyut, içerik veya kütle açısından, az ya da çok, farklar vardır. O kadar ki; dünyada tümüyle birbirinin aynı iki kum tanesi bulabilmek, imkansız yakındır. Küçük ölçekli dünyada karşılaşılan parçacıklar ise; elektrik yükü, kütle, spin gibi 'belirleyici fiziksel özellikler'ine göre sınıflandırılırlar.

Önemli olan şu ki; aynı türden parçacıklar, örneğin nötronlar, bu belirleyici fiziksel özellikler açısından, birbirlerinin tıpatıp aynısıdır. Protonlar ve elektronlar da, kendi aralarında öyle...

Bazı fiziksel özelliklerin alabileceği değerler kesintisizdir. Örneğin uzunluk, 0 ile sonsuz arasında herhangi bir değere sahip olabilir. Halbuki elektrik yükü, paketler halinde gelir. Gözlemlenebilen en küçük yük paketinin büyüklüğü,  $e$  kadardır.<sup>1</sup> O halde, gözlemlenebilen tüm yükler,  $e$ 'nin pozitif veya negatif tamsayı bir katına eşit olmak zorundadır. Nötronlar net elektrik yükü taşımaz. Proton ise,  $+e$  yüküdür. Çekirdeğin toplam yükü; protonların yüklerinin toplamına, yani proton sayısı ile  $+e$ 'nin çarpımına eşittir. Çekirdekteki proton sayısı  $Z$  ile gösterilirse,  $+Ze$ 'ye...

Benzer yükler birbirini iter, zıt yükler çeker. Bu 'elektrostatik' kuvvete, 'Coulomb kuvveti' de denir. O halde,

Element	Atom #	Evren	Dünya	İnsan
Hidrojen, H	1	91	0.14	9.5
Helyum, He	2	9	*	*
Karbon, C	6	0.02	0.03	18.5
Nitrojen, N	7	0.04	*	3.3
Oksijen, O	8	0.06	47	65
Sodyum, Na	11	*	2.8	0.2
Magnezyum, Mg	12	*	2.1	0.1
Fosfor, P	15	*	0.07	1
Kükürt, S	16	*	0.03	0.3
Klor, Cl	17	*	0.01	0.2
Potasyum; K	19	*	2.6	0.4
Kalsiyum, Ca	20	*	3.6	1.5
Demir, Fe	26	*	5	*
* Eser miktarda				



mamız gerekir. Adeta bir yayı sıkıştır-  
makta, enerji harcayarak üzerinde iş  
yapmaktayızdır. Harcadığımız enerji,  
'yay'ın potansiyel enerjisinde birikir.  
Çekirdekleri, güçlü kuvvet kalıntılarının  
etkin olabileceği kısa mesafelere,  
metrenin milyonda birinin milyarda bi-  
rine kadar yaklaştırdığımızda ( $10^{-15}$  m),  
güçlü kuvvet kancasını atıp, yayı kilit-  
ler (bkz. kuvvetler). Çekirdekler kay-  
naşmış olur. Hatta bu sırada, enerji de  
açığa çıkar ve toplam kütle azalır  
(bkz. kütle eksikliği). Yani sanki kanca  
takılırken bir de 'patlama' gerçekleş-  
miştir. Bu enerji, başka çekirdekleri

kaynaştırmakta kullanılabilir. Acaba yayı  
başlangıçta yeterince sıkıştırmak için  
ne kadar enerji harcamamız gerekir?

İki proton arasındaki itme engelini  
aşıp, güçlü çekimin menziline sokmak  
için gereken enerji miktarı, bildiğimiz  
kalorinin on binde birinin milyarda bi-  
ri kadar; proton başına bunun yarısı.  
Protonları yükleri sayesinde bir elek-  
trik alanında hızlandırıp, kafa kafaya  
çarpıştırarak kaynaştırmaya çalışmak  
mümkün. Nitekim, buna benzer deney-  
ler, maddenin yapısını araştırmak için  
kullanılan hızlandırıcılarda yapılıyor.  
Ancak, doğada hızlandırıcılar yok. Ger-

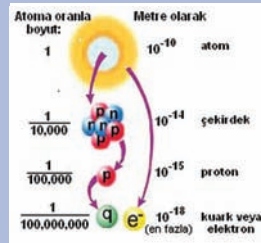
çi yüksek sıcaklıklar var. Ama proton  
başına enerji, yaklaşık 5 'milyar Kel-  
vin' sıcaklığa karşılık gelmekte. Dün-  
ya'da böyle yüksek sıcaklıkları oluşturu-  
racak bilinen hiçbir mekanizma yok.  
Bilindiği kadarıyla geçmişte de olmadı.  
Öte yandan, her elemente ait tek bir  
çekirdek yerine, değişen sayılarda izo-  
topları da var (bkz. doğal izotoplar).  
Bunların bazıları kararsız, sürekli bo-  
zunuyor. İzotopların elementlere göre  
çok daha kalabalık olan görüntüsüne  
bakıldığında; fırtınalı süreçlerle ve ge-  
lişigüzel bir şekilde üretilmiş olmaları  
gerekmemekte. Dünyamızdaki element-

çekirdeklerdeki protonlar birbirini itmek-  
tedir. Çekirdekçikler arasında bir de,  
elektrostatik kuvvetten 137 kat daha  
şiddetli ve sadece çekici olan bir 'güç-  
lü kuvvet' var. Protonların birbirini it-  
mesine rağmen çekirdeği bir arada tutan,  
bu güçlü kuvvetin 'kalıntı'ları.

Atomda ayrıca, çekirdeğin dışındaki  
yörünge kabuklarında, elektronlar yer  
almaktadır. Eksi yüklü elektronları çekir-  
değe bağlayan, artı yüklü çekirdeğin  
uyguladığı elektrostatik çekim kuvveti-  
dir. Elektronun yükü, büyüklükçe pro-  
tonun yüküne eşit olmakla beraber, zıt  
işaretli, yani  $-e$ 'dir. Nötür bir atomun  
yörünge kabuklarındaki elektronların  
sayısı, çekirdeğindeki protonların sayı-  
sına eşittir. Nötür atomlar bu sayede,  
net yük taşımaz. Ancak, kimyasal tepki-  
melere girip çıkarken elektron alıp ve-  
rebilir; iyonlaşıp yüklü hale gelebilirler.  
Bir atomun diğer atomlarla ne gibi  
kimyasal tepkimelere gireceğini, yani  
kimyasal davranışlarını; yörünge ka-

buklarının yapısı ve kabuk-  
lardaki elektronların sayısı  
belirler. Kabukların yapısı,  
çekirdeğin yükü, yani  $+Ze$   
tarafından belirlenir. Elek-  
tron sayısı da, nötr bir  
atom için  $Z$ 'ye eşit oldu-  
ğuna göre,  $Z$ ; atomun kimya-  
sal davranışlarının temel belirleyicisi-  
dir. Bu yüzden  $Z$ 'ye; atomun periyodik  
tablodaki hangi elemente ait olduğunu  
belirleyen sayı anlamında, 'atom numarası'  
da denir.

**Boyut:** Özetle; kuark üçlülerinden  
oluşan çekirdekçikler, çeşitli sayılarla  
bir araya gelip, atomun çekirdeğini  
oluşturuyor. Protonların artı yükünün  
çekim kuvvetine yakalanan elektron-  
lar; çekirdek civarında yörüngelere  
oturup, bu yükü nötrleyerek, atomun  
yapısını tamamlıyor. Sonuç olarak oluş-  
an yapıda; kuarklar çekirdekçiklerin  
içinde, çok büyük kinetik enerjilerle  
vınlayıp durur ve çekirdekçikler de çe-

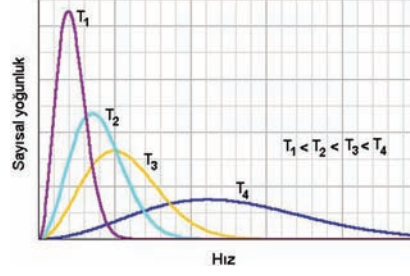


kirdeğin içinde kıpır kıpır  
kıpırdanırken, elektronlar  
dış yörüngelerde vızıldıyor-  
yorlar. Atomun boyutu  $10^{-10}$   
metre düzeyinde. Onun  
bu küçük boyutundan,  
şiddeti görece yüksek  
olan elektromanyetik kuv-  
vet sorumlu. Çekirdeğin boyutu ise,  
çok daha küçük,  $10^{-14}$  metre kadar.  
Bu boyutun atomunkine göre 10,000 kat  
daha küçük olmasından, elektroman-  
yetik kuvvete göre 137 kat daha şid-  
detli olan güçlü kuvvet sorumlu. Çün-  
kü, parçacıkların arasındaki çekim  
kuvveti ne kadar güçlü ise, oluşan yapı-  
nın o kadar küçük olması beklenir.  
Çekirdekçikğin boyutu  $10^{-15}$ , elektron  
veya kuarkları ise  $10^{-18}$  metre düze-  
yinde. Yani bir çekirdekçik, elektron  
veya kuarkın 1,000 katı; çekirdek çekir-  
dekçikğin 10'larca, atom da çekirde-  
ğin 10,000 katı yarıçapa sahip. Bu un-  
surlar için küresel şekiller düşünüle-

ler, başka yerlerde oluştuktan sonra buraya gelmiş olmaları.

Toparlayacak olursak; kuramsal olarak, demirden küçük herhangi iki çekirdeğin kaynaşması, ürünün yine demirden küçük bir çekirdek olması kaydıyla, enerji açığa çıkarır. Ancak, çekirdeklerin kaynaşması için, güçlü kuvvetin kısa menziline kadar yaklaştırılmaları gerekir. Halbuki, yörüngelerdeki elektron bulutlarının eksi, çekirdeklerdeki protonların da artı yükleri birbirini itmektedir. Elektronların itme kuvveti, atomların, örneğin yüksek sıcaklıklara kadar ısıtılıp tümüyle iyonlaştırılarak plazma haline getirilmesiyle aşılabılır. Atomun boyutu çekirdeğinkinin 10.000 katı olduğuna göre (bknz. çekirdeğin yapısı), çekirdeklerin birbirine yaklaşma imkanı büyük oranda arttırılmış olur. Fakat bu durumda da hala, protonların itme kuvvetinin, kaynaşma sağlanana kadar yenilmesi gerekmektedir. Çekirdekler arasındaki, elektrostatik itme kuvvetinden kaynaklanan potansiyel enerji tümseğine 'Coulomb engeli' denir. Bu engel, proton sayısı arttıkça yükselir. Dolayısıyla, en az sayıda proton içeren çekirdeklerin görece kolay kaynaşması beklenir. Örneğin iki hidrojenin...

Hidrojen çekirdekleri için Coulomb engeli 0,9 MeV kadar olup, pro-



ton başına 0,45 MeV kinetik enerji gerektirir. Bu ise, yaklaşık 5 GK (GK=10<sup>9</sup> K) sıcaklığa eşdeğer bir eşik oluşturur. Halbuki, en büyük yıldızların merkezi dahi bu kadar sıcak değildir. Ancak, füzyon tepkimelerinin başlaması için plazma sıcaklığının, Coulomb eşiğini aşacak kadar yüksek düzeylere tırmanması gerekmez. Çünkü, kuantum mekaniğine göre, enerjisi bu eşik altında kalan çekirdeklerin bile, potansiyel enerji tümseğini 'tünelleme' yoluyla aşarak kaynaşmaları olasılığı vardır. Bu olasılık, plazma yüksek basınçlar altında sıkıştırılıp, çekirdeklerin sayısal yoğunluğu arttırıldıkça artar. Tünellemeyi bir kez başardıktan sonra sistem, önceki kadar toplam enerjiye sahiptir; sıcaklığı azalmaz. Dolayısıyla, sisteme dışarıdan eşik yüksekliği kadar enerji verilmesine gerek kalmaz. Öte yandan, belli bir sıcaklıktaki plazmayı oluşturan parçacıkların kinetik enerjileri, çan eğrisine benzeyen Max-

well-Boltzmann dağılımı şeklindedir ve sıcaklık, bu kinetik enerji dağılımının ortalamasına belirlenir ( $mv^2 \approx kT$ ). Dolayısıyla, kinetik enerjisi ortalamasının üzerinde olan çekirdeklerin, çarpışmaları halinde kaynaşma olasılığı, ortalama çekirdeklerinkinden daha büyüktür. Kaldı ki, ortalama enerji Coulomb eşiğinin altında olsa bile, dağılımın yüksek enerji kuyruğunun en ucundaki çekirdeklerin kinetik enerjileri bu eşik aşar. Bu çekirdekler, kafa kafaya çarpıştıklarında kaynaşabilirler. Dağılım, yukarı ucundaki en yüksek enerjili parçacıklarından bazılarını yitirmekte olduğundan, soğumaya yüz tutarken; bir yandan da, açığa çıkan füzyon enerjisiyle, belki daha bile fazla ısınabilir. Başlayan füzyon tepkimelerinin, artarak devam etmesi ve sıcaklığı yükseltip, tepkimelerin daha kolay gerçekleşeceği bir denge düzeyine ulaştırması mümkündür...

Fakat, iki protonlu çekirdek kararlı değildir. Nitekim, doğada böyle bir çekirdek yok. Bu yüzden, oluşan çekirdeklerdeki protonlardan birinin, bir pozitronla bir nötrino ışıyarak nötrona, çekirdeğin kendisinin de böylelikle dötteryuma dönüşmesi gerekir. Ki; oluşan nötronla proton aralarında mezon alışverişinde bulunarak, bir arada kalmalarını sağlayacak olan güçlü kuvvet ka-

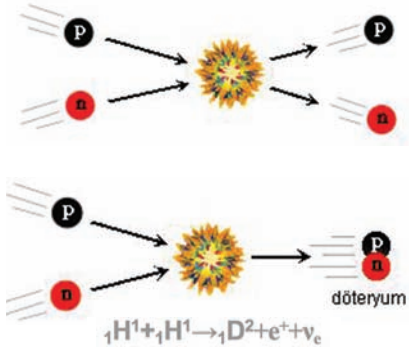
cek olursa, yarıçapın küpüyle orantılı olan hacimler arasındaki farklar, çok daha büyük oluyor. Örneğin atom, çekirdeğinin trilyon katı kadar hacime sahip. Yani çekirdek 1 cm<sup>3</sup> hacmindeki bir bilye kadar olsaydı eğer, atom; 100x100x100 metre boyutlarındaki bir kapalı stadyumun, 1,000,000 m<sup>3</sup>'lük hacmine sahip olurdu: Maddenin neredeyse tamamı boşluk!...

**İzotop:** Aynı elemente ait çekirdeklerin proton sayıları aynıdır. Fakat, nötron sayıları farklı olabilir. Belli bir elemente ait olup, nötron sayıları farklı olan çekirdeklere, o elementin 'izotop'ları denir. O halde bir elementin farklı izotopları, aynı çekirdek yüküne, ama farklı kütlelere sahiptir. Nötronun kütlesi protonunkinden biraz büyük, fakat aradaki fark küçüktür. O halde çekirdeğin kütlesini, nötron ve proton sayılarının toplamından oluşan çekirdekçik sayısı, yaklaşık olarak belirler. Bu yüzden, A ile gösterilen bu

sayıya, 'çekirdeğin kütle numarası' denir. Proton sayısı Z olduğuna göre, A-Z, nötron sayısını verir. Gerçi nötrün bir atomun yörünge kabuklarında, çekirdeğindeki proton sayısı kadar elektron bulunur. Fakat, elektronun kütlesi protonunkinin 1/1836'sı kadar olup, çekirdekçiklerin yanında gözardı edilebilir. Dolayısıyla, atomun toplam kütlesi kabaca, çekirdeğinkine eşittir. Bu yüzden, A'ya, 'atomun kütle numarası' da denir.

Atomlar, ait oldukları elementin 'kimyasal simge'sini oluşturan harflerle gösterilirler. Örneğin; hidrojenin H, karbonun C, kurşunun Pb ile gösterilmesinde olduğu gibi. Tek başına kimyasal simge, atomun çekirdeğindeki proton sayısını dolaylı olarak verir, fakat nötron sayısı hakkında ipucu vermez. Örneğin karbon elementi 6 protona sahiptir ve bir atom için C simgesi kullanıldığında, o atomun çekirdeğinde 6 proton olduğu anlaşılır. An-

cak, doğada bulunan karbon çekirdeklerinin %98,1'i 6 nötron içerirken, %1,1 kadarında da 7 nötron bulunur. Yani doğal karbon, kütle numaraları 12 ve 13 olan iki izotoptan oluşmaktadır. Halbuki, karbon sadece C simgesiyle gösterildiğinde, bu 'izotop'lardan hangisinin kastedildiği anlaşılmaz. Bu yüzden, izotoplardan söz ederken, daha ayrıntılı bir gösterime gerek duyulur. Örneğin karbonun sözkonusu izotopları için, C simgesinden sonra 'tire' işaretiyle ayrılmış halde kütle numaraları yazılabilir: C-12, C-13. Bu durumda, karbonun atom numarasının 6 olduğu hatırlanırsa, nötron sayıları gerektiğinde, kütle numaralarından hareketle, 12-6=6 ve 13-6=7 olarak hesaplanabilir. Ancak genelde, proton sayısını hatırlamak zorunda kalmamak için, biraz daha ayrıntılı bir gösterim kullanılır. Yaygın kabul gören böyle bir gösterim, diyelim X elementi için; atom numarasını simgenin sol



lıntısını oluşturabilinler. Buradaki nötrino 0,42 MeV enerji taşır. Gerçi iki protonun kütlesi, döteryumla pozitronun yanında nötrinin enerjisini, ancak da olsa karşılamaya yeterlidir. Fakat, oluşan döteryum çekirdekleri zar zor kararlıdır. Oluşur oluşmaz, ikişerli birleşerek, çok daha kararlı olan 'çift sihirli'  ${}^4_2\text{He}^4$  çekirdeklerine dönüşmeleri gerekir. Aksi halde hemen bozunurlar. Yani, döteryumun üretilebilmesi için; sıcaklığın bu çekirdeklerin oluşmasına imkan verecek kadar yüksek, fakat oluşmalarından sonra da, hemen bozunmayıp, birleşerek  ${}^4_2\text{He}^4$  oluşturmalarına fırsat verecek kadar düşük olması gerekir. Böyle bir sıcaklık aralığı yok. Nitekim, evrene baktığımızda, anlamlı düzeyde döteryum üretimi görülüyor. Hatta tam tersine, yıldızlar döteryum tüketmekte. Dün-



ya'da yapılan ve gerek protonların birleştirilmesi, gerekse büyük çekirdeklerin parçacık bombardımanıyla yarılması ('spallation') şeklindeki deneysel çalışmalarda, döteryum üretimi için bir yöntem bulunamadı. Buna 'döteryum darboğazı' deniyor. Oysa ki, evrende hatırı sayılır miktarda D<sub>2</sub> veya HD gazı var. Evrenin kütlece %0,015'i bu çekirdekten oluşuyor. Hem de hangi tarafa bakılırsa bakılsın, bu oran aynı. Dünya'da ise, okyanus sularındaki hid-

rojenlerin 1/6666'sı döteryum. O zaman, bu döteryumun nereden geldiği sorusu doğar. Döteryumların, oluştukları yüksek sıcaklıklarda kısa sürede bozunduklarına göre, çok hızlı ve büyük sayılarla oluşmuş olmaları lazım. Ki, bozunmaya fırsat bulamadan, çok daha kararlı olan  ${}^4_2\text{He}^4$  çekirdeklerine kaynaşabilinler. Ama ondan sonra da, ortamın ansızın soğumuş olması gerekiyor. Ki, bir kez oluştuktan sonra kararlı kalabilinler. Böyle bir süreç, mil-

alt, kütle numarasını da sağ üst köşesine yazarak elde edilir:  ${}_Z\text{X}^A$ . Bu tarife göre, karbonun sözkonusu iki izotopu  ${}^{12}_6\text{C}^{12}$  ve  ${}^{13}_6\text{C}^{13}$  şeklinde gösterilir. Proton sayısını hatırlamaya gerek kalmaz. Nötron sayısını bulmak kolaylaşır. Bir başka örnek, atom numarası 92 olan uranyum elementinin, doğadaki en bol izotopları olan  ${}^{235}_{92}\text{U}^{235}$  ve  ${}^{238}_{92}\text{U}^{238}$ ...

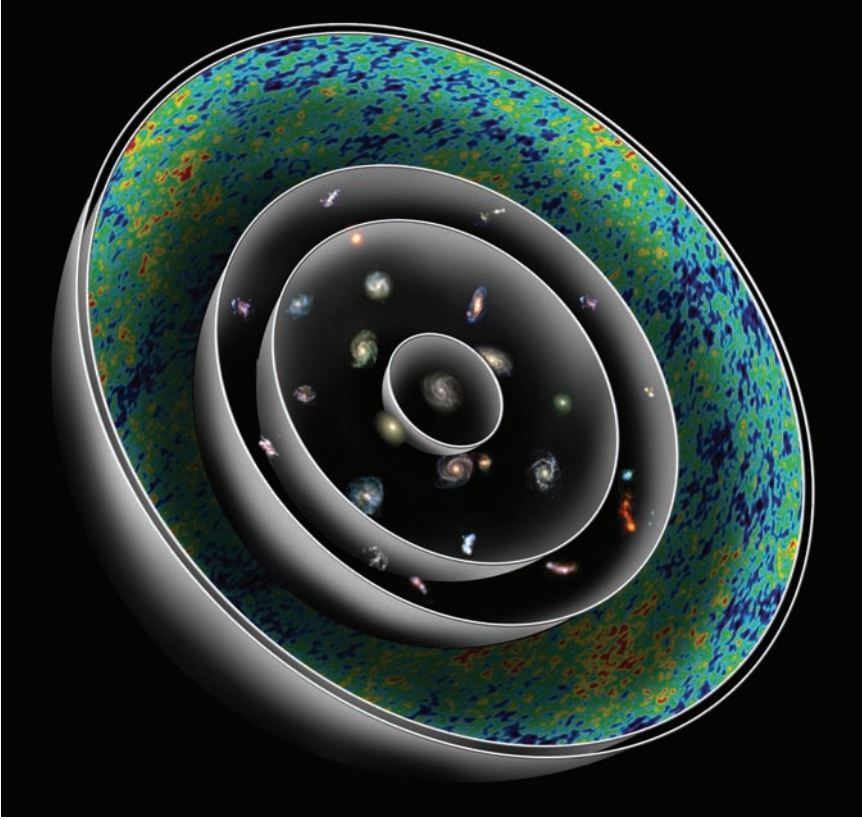
Halbuki molekül formülleri, molekülü oluşturan elementlerin kimyasal simgelerinin yan yana dizilip, her simgenin sağ alt köşesine, tek bir moleküldeki o elemente ait atomların sayısının yazılmasıyla oluşturulur. Örneğin, bir karbon ve iki oksijenden oluşan karbondioksit molekülü, CO<sub>2</sub> olarak gösterilir. İki karbon ve altı hidrojen atomundan oluşan 'etan molekülü' ise, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> şeklinde... Burada, karbonun hangi izotopunun kastedildiği belirtilmemektedir. Halbuki aslında, örneğin havadaki karbondioksit moleküllerinden çoğu C-12, az bir kısmı da C-13

içerir. Hatta, aynı C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> molekülü içindeki iki karbon atomundan birisi C-12, diğeri C-13 olabilir. Ancak kimyada bu farkı belirtmeye, çoğu zaman gerek yoktur. Çünkü bir elementin farklı izotopları, kimyasal davranışları açısından hemen hemen farksızdır. Yani, kimyasal tepkimeler izotop farkı gütmezler. Bu yüzden, kimya formüllerinde genel olarak, izotoplar belirtilmez. İzotoplar daha çok, 'çekirdek olayları' ile ilgili olarak gündeme gelirler.

**Kütle:** Standart kütle birimi kg, küçük ölçekte çalışırken fazla büyük bir birimdir. Bu nedenle, atomların kütlelerini ölçmek için, 'atom kütle birimi' denilen ve *u* ile gösterilen, daha küçük bir birim kullanılır. Bu birimin tanımı, 'durağan<sup>2</sup> halde ve temel enerji düzeyindeki bir  ${}^{12}_6\text{C}^{12}$  izotopunun kütlelerinin 12'de biri' şeklinde. Ancak, tanımın işlerlik kazanması için,  ${}^{12}_6\text{C}^{12}$  izotopunun kütlelerinin bilinmesi gerekiyor. Burada ise devreye, 'mol'ün tanı-

mı girer. Herhangi bir malzemenin 1 molü diye, 'malzemeyi oluşturan yapıtaşlarının belli bir sayıdaki, Avogadro sayısı kadarki miktarı'na denir. Avogadro sayısı ise, 'durağan halde ve temel enerji düzeyindeki  ${}^{12}_6\text{C}^{12}$  izotoplarının 12 gramındaki atom sayısı' olarak tanımlıdır. Atomları saymak henüz mümkün olmadığından, başka yöntemlerle belirlenen bu sayının değeri, yaklaşık  $N_A=6,022 \times 10^{23}$  kadardır. O halde, 12 gram  ${}^{12}_6\text{C}^{12}$  izotopunda  $N_A$  sayıda atom bulunduğu ve atom kütle birimi de, tek bir  ${}^{12}_6\text{C}^{12}$  izotopunun kütlelerinin 1/12'si olduğuna göre:  
 $1 \text{ u} = (1/12) \times (12/N_A) = 1/N_A = 1,66 \times 10^{-27} \text{ kg}'\text{dır}.$

Bu birim cinsinden, elektronun kütleleri 0,000549 u iken; protonunki  $m_p=1,007276 \text{ u}$ , nötronunki ise  $m_n=1,008665 \text{ u}$ 'dur. Yani, nötronun kütleleri protonunkinden 0,001389 u daha fazla olup, bu fark, elektronun kütlelerinin iki mislinden büyüktür.



yarlarca Kelvin sıcaklıklar gerektirir ve de santimereküp başına trilyonlarca ton kütle yoğunlukları; saniyenin tasavvur edemeyeceğimiz kadar küçük bir kesrinde azalan... Nasıl oluşmuş

olabilir böyle koşullar? Nerede ve ne zaman?

Yıldızların ışınım tayfından hareketle, hızlarını da belirlemek mümkün: Doppler kayması. Yapılan incele-

meler, komşu gökadalardan bizden uzaklaşmakta olduğunu gösteriyor. Hem de daha uzak olanların daha yüksek hızla...<sup>1</sup> Evren genişliyor, hem de hızlanarak. Dolayısıyla, seyrettiğimiz evren manzarası; giderek genişleyen uzay-zamanda birbirinden uzaklaşan milyarlarca gökadedan oluşmakta. Uzayın sınırı yok. Ama, zamanın bir başlangıcı olmak zorunda. O zaman da aklı, "başlangıçta ne vardı" sorusu geliyor, "evren buraya nereden ve nasıl geldi?" Bu sorunun yanıtını, doğa yasalarının zamana göre simetrisinden yararlanarak bulmak mümkün: İzlenen film tersine oynatıldığında, zamanda geriye gidildikçe, gökadalardan birbirine yaklaşır, iç içe girerler. Sonra yıldızlar, atomlar ve çekirdekler. En sonunda, yani başlangıçta: Büyük Patlama. Ancak bu patlama; madde ve enerjinin, zaten var olan uzayın bir yerinde ansızın belirip dağılması değil; ansızın patlayan 'uzay-zaman'da dağılması. Dolayısıyla, gökadalardan hareketi; kendilerinin hızından ziyade, aralarındaki uzayın genişliyor olmasından kaynaklanıyor. Bir başka benzetmeyle, fırında kabarmakta olan bir kekin içindeki üzüm tanelerinin birbirinden uzaklaşmasında olduğu gibi. Filmin

## Doğal izotoplar

Doğada, hidrojen-den uranyuma kadar, 92 element var. Bunlar, her biri değişik sayılarda olmak üzere, toplam 307 izotopa sahip. Bu doğal izotoplardan, bilindiği kadarıyla 244'ü kararlı. Kalan 63'ü kararsız. Elementlerden 80'i, en az bir kararlı izotopa sahip. Bunlar, ilk 82 element arasında yer alıyor. Yani; hidrojen-den kurşuna ( $_{82}\text{Pb}$ ) kadarki ilk 82 elementin, ikisi hariç hepsinin, en az birer, bazılarının birden fazla kararlı izotopu var. İstisnalar, doğada kararlı izotopu bulunmayan teknesyum ( $_{43}\text{Tc}$ ) ile prometyum ( $_{61}\text{Pm}$ ). En fazla sayıda kararlı izotopu olan element, 10 kararlı izotopla kalay ( $_{50}\text{Sn}$ ). Ardından, 9 kararlı izotopu sahip yegane element olan ksenon ( $_{54}\text{Xe}$ ) geliyor. Kararlı izotop sayısı 8 olan element yok. Atom numarası 82'den büyük olan 10 elementin ise, Tc ve Pm gibi, sadece radyoaktif izotopları var.

Dolayısıyla, yaşı 4,55 milyar yılı aşan Dünyamızda kararsız bir izotopun hâlâ var olması üç şekilde açıklanabilir: Ya bu kararsız izotopun yarılanma ömrü, en azından Dünya'nın yaşıyla kıyaslanabilir düzeyde veya daha uzundur, ya yarılanma ömrü böyle uzun olan kararsız bir izotopun bozunma ürünüdür, ya da Dünya'da halen sentezlenmektedir. Uzun yarılanma ömürlü izotoplardan oluşan birinci gruba örnek, 4,43 milyar yıl yarılanma ömürlü  $_{92}\text{U}^{238}$  izotopu. Yarılanma ömrü Dünya'nın yaşına yakın olduğundan, bu izotopun Dünya'da halen var olan miktarı, gezegenimizin oluştuğu zamandakinin yaklaşık yarısı kadar. Bu gruptaki en düşük yarılanma ömürleri, 700 milyon yıldan uzun. Örneğin  $_{92}\text{U}^{235}$  izotopununki 703,8 milyon yıl. Dolayısıyla, bu izotopun doğadaki miktarının, uranyum-238'e göre çok daha hızlı azalmış ve Dünya'nın oluştuğu zamandakinin,  $(1/2)^{4,55/0,7038} = \%1,13'$ üne inmiş olması gerekir. Nitekim, doğal uran-

yumdaki her 1000 çekirdekten, yaklaşık 993'ü  $_{92}\text{U}^{238}$  iken, sadece 7 kadarı  $_{92}\text{U}^{235}$ 'dir. Bozunma ürünlerinden oluşan ikinci gruba örnek,  $_{92}\text{U}^{238}$  izotopunun alfa bozunmasıyla oluşan, 24,1 gün yarılanma ömürlü  $_{90}\text{Th}^{234}$  izotopudur.  $_{6}\text{C}^{14}$  izotopu, üyeleri sürekli sentezlenen sonuncu gruba bir örnek oluşturur. Çünkü, 5730 yıl yarılanma ömürlü bu izotop atmosferin dış katmanlarında; yüksek enerjili parçacıklardan oluşan kozmik ışınların arasındaki protonlardan bazılarının  $_{8}\text{O}^{16}$  çekirdeklerine çarparak oluşmasına yol açtığı termal nötronları yutan nitrojen-14 izotoplarının proton salmasıyla sürekli olarak üretilmektedir ( $n + {}_7\text{N}^{14} \rightarrow {}_6\text{C}^{14} + {}_1\text{H}^1$ ).

Kararlı izotopların hepsinin, temel enerji durumunda olmaları beklenir. Çünkü, ilk oluştuğlarında uyarılmış halde olsalardı dahi, oluşmalarından bu yana; sadece Dünya'nın yaşının 4,5 milyar yıl olduğu göz önünde bulundurulursa; temel enerji durumuna geçiş yapmaları için yeterince



## Kabuk Modeli

Çekirdekdeki protonlarla nötronların oluşturduğu yapı da, atomdaki elektronlarınkine benzetilebilir. Çekirdeğin 'kabuk modeli' denilen bu tasarıma göre, çekirdekçikler; birlikte oluşturdukları merkez odaklı bir potansiyelin içerisinde, farklı enerji düzeylerinde otururlar. Artan sırada ardışık enerji düzeylerine karşılık gelen yörüngeler, elektronlarda olduğu gibi, dış dışa altkabuklardan oluşan bir kabuk yapısına sahiptir. Protonlar ve nötronlar, farklı parçacık türleri olduklarından, birbirlerinden bağımsız yörünge kabuklarını doldururlar. Ardışık enerji düzeyleri arasındaki farklar, atomlarda eV

veya kesri kadar iken, çekirdeklerde keV, hatta MeV düzeyinde olabilir. Her iki çekirdekçik türünün de bu kabuk yapısını, alttan yukarıya doğru sıra atlatmaksızın doldurmaları halinde, çekirdek olası en düşük enerji düzeyindedir. Bu enerji düzeyi, 'temel enerji durumu'na karşılık gelir. Çekirdekçiklerden bazılarının, temel enerji durumundaki dizilimin gerektirdiğinden daha yüksek enerji düzeylerinde bulunması halinde, çekirdeğin 'uyarılmış hal'de olduğu söylenir. Uyarılmış çekirdek, hızla foton ışıyarak temel enerji durumuna geçer. Atomların ışıdığından çok daha yüksek enerjilere sahip olan bu fotonlar, gama ışını olarak adlandırılır.

tersinde, başlangıca doğru gidilince, koşullar nasıldı acaba?

Zamanda geriye gidip yerinde incelemek mümkün olmadığından, ağır iyonların çarpıştırıldığı laboratuvarlardaki güçlü hızlandırıcılarda (RHIC), benzer koşulların oluşturulmasına çalışılıyor. Örneğin altın çekirdeklerini, ışık hızının %99,99'una kadar hızlandırdıktan sonra, kafa kafaya çarpıştırıp

paramparça etmek suretiyle. Bir altın çekirdeğini bu hıza ulaştırmak için verilmesi gereken enerji (100 GeV), Güneş'in merkezindeki sıcaklığın 150.000 katına karşılık gelir. Çekirdek o hıza ulaştığında; hareket yönündeki çapı, bu yöne dik olan çapı aynı kalırken 70'te birine (Lorentz) kısaldığından, ince açılmış bir yufkaya döner. Kütesinin, başlangıçta zaten santimet-

reküp başına milyar ton ( $10^{18}$  kg/m<sup>3</sup>) düzeyinde olan yoğunluğu, 100 misline çıkar. Çekirdekler çarpıştığında, 'yufka'lar inceler, yoğunluk daha da artar. Çekirdekleri oluşturan nötronlar ve protonlar, kuarklarına ve onları bir arada tutan gluonlarına kadar parçalanırlar. Bir 'kuark-gluon' plazması oluşur...

Çöken evren modelleri, bu koşulların daha da gerisine gidiyor. Bulgular kabaca şöyle...

**İlksel elementler:** 'Büyük Patlama'yı izleyen hızlı büyüme ('enfasyon') sırasında, evrende sadece fotonlar vardı. Enfasyon  $10^{-32}$ . saniyede yavaşlayıp da, evren 'yeniden ısınma'ya başlayınca; maddenin yapıtaşlarını oluşturan kuarklarla, güçlü kuvvetin taşıyıcıları olan gluonlar ve elektronlarla nötrinolar oluştu. Evren, bir 'kuark-gluon plazması' haline gelmişti. Plazma 0,02. saniyede 100 GK'e (8,6 MeV) kadar soğuyunca, hemen hemen eşit sayıda proton ve nötron oluştu. Evren hala foton ağırlıklıydı. Çekirdekçik başına  $10^9$  kadar foton düşüyordu. Yüksek enerjiye sahip olan bu fotonlar, pozitron-elektron 'çift'leri üretiyor, karşılaşan çiftlerin birbirini yoketmesiyle de üretiliyordu. Diğer yandan;

uzun bir zamanın geçmiş olması gerekir. Nitekim, birisi hariç, bütün kararlı izotoplar temel enerji durumundalar. İstisnayı oluşturan çekirdek, tantalum-180 izotopunun, 'orta' ('meta') kararlı bir enerji durumunda sıkışık kalmış olan  $^{180m1}_{73}\text{Ta}$  izomeri. Bu çekirdek, 'orta kararlı' durumdan temel enerji durumuna geçişi, spin-parite sakınımı ilkesi gereği güçlü bir şekilde yasaklandığından yapamıyor. İzotop bu yüzden orta kararlı. Halbuki bu geçişi yapacak olsa, orta kararlığını yitirecek. Çünkü, tantalum-180 izotopunun temel enerji durumu kararsız.

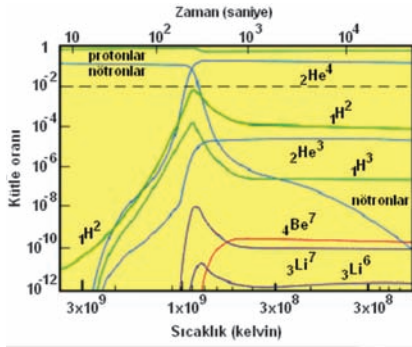
Herhangi bir altkabuktaki çekirdekçik sayısının çift olması, spinler ters yönde eşleştiğinden, daha düşük bir enerji düzeyiyle sonuçlanır. Bu yüzden, nötron veya proton sayısı çift olan çekirdekler, görece daha kararlıdır. Nötron veya proton sayısı; 'sihirli sayı' olarak nitelendirilen 2, 8, 20, 28, 50, 82 veya 126 değerlerinden birine eşit olan çekirdekler ise, sıradı-

şı bir kararlılığa sahiptir. En kararlı çekirdekler, hem nötron, hem de proton sayısı çift ve sihirli sayı olanlardır. 'Çifte sihirli' olarak nitelendirilen bu çekirdeklere örnekler arasında; helyum-4 ( $^4_2\text{He}$ ), oksijen-16 ( $^{16}_8\text{O}$ ), kalsiyum-40 ( $^{40}_{20}\text{Ca}$ ), kalsiyum-48 ( $^{48}_{20}\text{Ca}$ ), kalay-132 ( $^{132}_{50}\text{Sn}$ ) ve kurşun-208 ( $^{208}_{82}\text{Pb}$ ) izotopları sayılabilir. Dolayısıyla,  $^4_2\text{He}$  ve  $^{16}_8\text{O}$  izotoplarının, hidrojen sonra evrendeki, ikinci ve üçüncü en bol kararlı çekirdekler olmaları bir raslantı değildir.

Bu durumda en kararsız çekirdeklerin, tek sayıda proton ve tek sayıda nötron içerenler olması beklenir. Doğada böyle, yalnızca 5 izotop var. Bunlardan birisi olan  $^{40}_{19}\text{K}$  ilginç bir şekilde, beta bozunmalarının her üçünü birden; yani, hem nötron fakiri olan çekirdeklerden beklenen elektron yakalama veya pozitron ışımasını, hem de nötron zengini olan çekirdeklerden beklenen elektron ışımasını paralel olarak yapar. Yarılanma ömrü  $1.277 \times 10^9$  yıl.

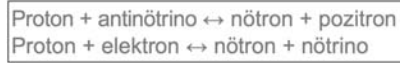
Bir izotopun kararsız sayılabilmesi için, çekirdek sayısında zamanla yer alan azalmanın ölçülebilmesi gerekir. Bozunma çok yavaşsa eğer, bu azalmanın ölçüm duyarlılığının altında kalması ve dolayısıyla da, aslında kararsız olan bir izotopun kararlı sayılması mümkündür. Nitekim, çekirdek modelleriyle yapılan hesaplamalar, kararlı bilinen pek çok izotopun  $10^{18}$  yıl veya daha uzun yarılanma ömürleriyle bozunmaları gerektiğini gösteriyor. Gerçekten de bozundukları deneysel olarak belirlenenler, kararlı sınıftan çıkartılıp kararsız sınıfına alınır. Bunun en yakın örneği; daha önceleri kararlı bilinen bizmut-209 ( $^{209}_{83}\text{Bi}$ ) ve tungsten-180 ( $^{180}_{74}\text{W}$ ) izotoplarının 2003 yılında, sırasıyla  $19 \times 10^{18}$  ve  $1,8 \times 10^{18}$  yıl yarıömürle alfa aktif olduklarının belirlenmesiydi.<sup>2</sup>

Doğal olan 307 izotopun yanında, bir de insan yapımı olanlar var. Yapay izotopların hepsi kararsız. Doğal veya yapay, bilinen izotopların sayısı 2600...

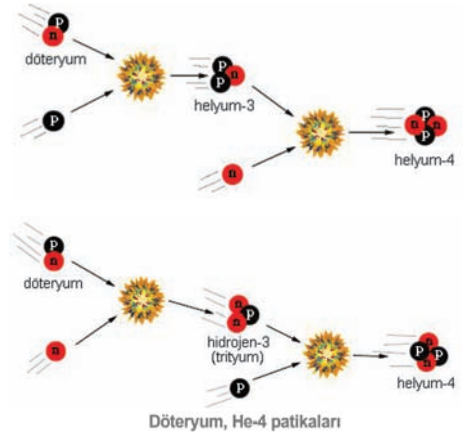


nötronlar ya pozitron soğurup antinötrino ışırarak, ya da nötrino soğurup elektron salarak protonlara dönüşmekteydi. Protonlar da, ya elektron soğurup nötrino ışırarak veya antinötrino soğurup pozitron salarak nötronlara...

Ancak, nötronun kütlesi protonunkinden büyük olduğundan, protonu nötrona dönüştüren elektronların enerjisinin daha yüksek olması gerek-



mekteydi. 0,11 saniyeden sonra sıcaklık 30 GK'in (2,6 MeV) altına inip de, böyle yüksek enerjili çiftlerin sayısı azalınca; protonlar nötrona dönüşemez oldular. Halbuki, nötronlar protona dönüşmeye devam ediyordu. 13,8. saniyede sıcaklık 3 GK'e (260 keV) indiğinde, çift üretimi hepten durmuştu. Nötronlar 15 dakika gibi görece uzun bir yarılanma ömrüyle de olsa, bozunarak azalmakta, protonların sayısı artmaktaydı. Arada nötron-proton kaynaşmasıyla, ya da daha düşük bir olasılıkla proton-proton kaynaşmasından sonra pozitron ve nötrino ışınmasıyla döteryum çekirdekleri oluşmakla beraber; parçacık başına ortalama kinetik enerji döteryumun bağlanma enerjisinden daha yüksek olduğundan, oluşan çekirdekler, izleyen çarpışmalar sonucunda hemen anında parçalanıyordu. 3 dakika 2. saniyede, sıcaklık 1 GK'e (86 keV) inmiş ve yaklaşık her 7 protona karşı 1 nötron kalmıştı.



3 dakika 46. saniyede sıcaklık 0,9 GK'e (78 keV) indiğinde, döteryum ( $1D^2$ ) çekirdekleri artık kararlı olabiliyordu. Nötronların hemen hepsi protonlarla birleşip döteryum oluşturdu. Döteryumlar da; ya önce bir protonla kaynaşıp  $2He^3$  oluşturduktan sonra bir de nötron yutarak, ya da önce nötron yutup  $1T^3$  oluşturduktan sonra bir protonla kaynaşarak, helyum-4 ( $2He^4$ ) çe-

## Kütle Eksiği

Çekirdekdeki bağ enerjisi, atomdakine benzer şekilde, kütle azalmasına karşılık gelir. Ancak, atomdakinden farklı olarak, kütle azalması ölçülebilir düzeydedir. Çünkü, çekirdekdeki çekirdekçikler birbirlerine, elektromanyetik kuvvetin 137 misli daha şiddetli bir 'güçlü kuvvet'le bağlıdır. Kısa menzilli olan bu kuvvet, serbest protonlarla nötronların bir araya gelecek çekirdeği oluşturması sırasında, üzerlerinde iş yapar. Yapılan toplam işin yarısı, çekirdeğin bağ enerjisi olarak açığa çıkarken, parçacıkların kütlelerinin toplamı, bu bağ enerjisinin kütle eşdeğeri kadar azalır. Azalma miktarını, oluşan çekirdeğin kütlelerinden hareketle hesaplamak mümkündür. Örneğin, doğada bulunan ve atom numarası Z, kütle numarası A olan bir izotopun kütlesi  $ZM^A$  olarak ölçülmüş olsun. İzotop, Z tane serbest protonla A-Z tane serbest nötrondan oluştuğuna göre, oluşma sonucunda yer alan kütle azalması; ki buna 'kütle eksikliği' de deniyor;

Parçacık	İlgili birim cinsinden kütle		
	u	MeV	Kg
Elektron	0,000549	0,511	0,000911x10 <sup>-27</sup>
Proton	1,007276	938,27203	1,672622x10 <sup>-27</sup>
Nötron	1,008665	939,56556	1,674927x10 <sup>-27</sup>
Döteryum	2,013553	1875,60468	3,342498x10 <sup>-27</sup>
Alfa	4,00153	3727,38518	6,644656x10 <sup>-27</sup>

$\Delta M = Zm_p + (A-Z)m_n - zM^A$

kadardır. Dolayısıyla, çekirdeğin kütlesi, yapısındaki çekirdekçiklerin kütlelerinin toplamından  $\Delta M$  kadar daha azdır. Bu 'kütle eksikliği'nin enerji eşdeğeri, çekirdeğin toplam 'bağ enerjisi'ni (BE) verir:

$BE = \Delta M \cdot c^2 = [Zm_p + (A-Z)m_n - zM^A] \cdot c^2$

●● protonlar: 2x1,00728 u      ●●●● Alfa parçacığı

●●●● nötronlar: 2x1,00866 u

Toplam kütle: 4,03188 u      Alfanın kütlesi 4,00153 u

$1 u = 1,66054 \times 10^{-27} \text{ kg} = 931,494 \text{ MeV}/c^2$

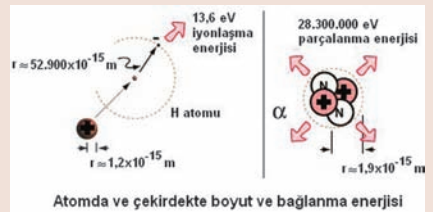
Dikkat edilecek olursa, eğer söz konusu izotop diyelim  $\Delta E$  kadar uyarılmış halde ise, ölçülen kütlesi, uyarılmamış çekirdeğinkinden,  $\Delta E/c^2$  daha büyük olur. Bu daha büyük kütle yukarıdaki ifadede kullanıldığında, uyarılmış çekirdeğin bağ enerjisi için, uyarılmamış çekirdeğinkinden,  $\Delta E$  kadar daha küçük bir değer elde edilir. Beklenen de zaten,  $\Delta E$  kadar uyarılmış çekirdeğin bağ enerjisinin,  $\Delta E$  kadar daha az olmasıdır. Yani, ifade uyarılmış çekirdekler için de geçerlidir. Ancak genelde, bir çekirdeğin bağ enerjisinden söz edilirken, izotopun uyarılmamış, yani temel enerji durumundaki hali kastedilir.

Örneğin helyum-4 izotopunun çekirdeğini oluşturan 'alfa parçacığı'nı ele alalım. İki protonla iki nötrondan oluşan bu çekirdeğin ölçülen kütlesi  $2M^4 = 4,00153 u$ . Nötron ve protonun kütleleri de,  $m_n = 1,008665 u$ ,  $m_p = 1,007276 u$  olduğuna göre;

$\Delta M = 2 \times 1,007276 + 2 \times 1,008665 - 4,00153 = 0,030352 u$

elde edilir. Öte yandan, kütle birimi  $u = 1,66 \times 10^{-27} \text{ kg} = 931,49 \text{ MeV}/c^2$  olduğuna göre:

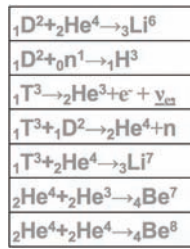
$\Delta M c^2 = 0,030352 \times 931,49 = 28,3 \text{ MeV}$



bulunur. Dolayısıyla, üstte şekilde de görüldüğü üzere; hidrojen atomunun iyonlaşma enerjisi 13,6 eV iken, helyum atomunun çekirdeğini oluşturan alfa parçacığının parçalanma, yani yarıparçalarını oluşturan iki protonla iki nötrona ayrıştırılma enerjisi 28,3 MeV'dir. Buna şaşmamak gerekir. Çünkü, iki parçacık arasındaki bağ enerjisinin negatifi, ikili sistemin mekanik enerjisine, bu da potansiyel enerjisinin yarısına eşittir. Potansiyel

çirdekleri oluşturmaya başladılar. Çe-  
çirdeklerin yapısında protonlarla bir  
araya gelen nötronlar, kararlılık ka-  
zandılar. Bozunmaları durdu. 34 dakı-  
ka 4. saniyede sıcaklık 0,3 GK'e (26  
keV) indiğinde, çekirdek kaynaşmaları  
sona erdi. Her 7 protondan geriye 6'sı  
kalmış, 1'i de nötronlarla birleşip, dö-  
teryum ve helyum-4 oluşturmuştu. Dö-  
teryumların bir kısmı, hızlı soğuma ne-  
deniyle kaynaşma fırsatı bulamadılar.  
Kalan protonlar hidrojen çekirdeği ol-  
du. Yani, evren bu aşamada kütlece;  
yaklaşık  $6/(6 \times 1 + 0,5 \times 4) = 0,75$  oranında  
 ${}^1_1\text{H}^1$  çekirdeklerinden,  $0,5 \times 4 / (6 \times 1 +$   
 $0,5 \times 4) = 0,25$  oranında da  ${}^2_2\text{He}^4$ 'ten olu-  
şuyordu.

Gerçi süreç  
son aşamalarında;  
 ${}^1_1\text{D}^2$  çekirdeklerin-  
den bazıları  ${}^2_2\text{He}^4$  çe-  
çirdekleriyle birleşip,  
kararlı  ${}^3_3\text{Li}^6$  çe-  
çirdeklerine veya



nötron yutarak, kararsız trityumlara  
( ${}^1_1\text{H}^3$ ) dönüştüler. 12,32 yıl yarılanma  
ömrüyle radyoaktif olan  ${}^1_1\text{T}^3$ , ya elek-  
tron ve antinötrino ışıyarak  ${}^2_2\text{He}^3$  çekir-

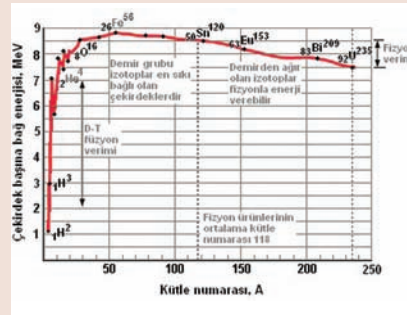
değine bozundu. Ya da  ${}^1_1\text{D}^2$  ile birleş-  
tikten sonra nötron salarak  ${}^2_2\text{He}^4$  üret-  
ti. Bazı  ${}^1_1\text{T}^3$  çekirdekleri de,  ${}^2_2\text{He}^4$  çekir-  
dekleriyle birleşip, kararlı  ${}^3_3\text{Li}^7$  çekir-

enerji ise, parçacıklar arasındaki kuv-  
vetin şiddetiyle doğru, uzaklıkla ters  
orantılıdır. Çekirdeği bir arada tutan  
güçlü kuvvet, yörünge elektronunu  
çekirdeğe bağlayan elektromanyetik  
kuvvetin 137 kat daha şiddetli, öte-  
yandan çekirdeğin boyutu da atomun-  
kinin 1/10.000'i kadar olduğuna göre;  
çekirdekdeki bir çekirdekçığın çe-  
çirdeğin kalan kısmına bağlanma  
enerjisi, atomdaki bir elektronun çe-  
çirdeğe bağlanma enerjisinin;  
 $100 / (1 / 10.000) = 1.000.000$  katı ka-  
dar olur.

**Çekirdek tepkimeleri:** Bir çekirde-  
ği oluşturan parçacıkların birbirlerine  
ne denli sıkı sıkıya bağlı olduğunun  
asıl göstergesi, toplam bağ enerjisi de-  
ğil, çekirdek başına bağ enerjisidir.  
Ki bu; toplam bağ enerjisi BE'nin,  
kütle numarası A'ya bölünmesiyle el-  
de edilir:

$$BE/A = [Zm_p + (A-Z)m_n - zMA] \cdot c^2 / A$$

Bu ifade herhangi bir izotop için,  
o izotopun ölçülmüş olan kütlesi ile,  
Z ve A değerlerini yerlerine koymak  
suretiyle hesaplanabilir. Yandaki gra-  
fikte, doğada bulunan izotoplar için  
hesaplanmış olan çekirdek başına  
bağlanma enerjilerinin, kütle num-  
arasına göre değerleri görülüyor. Her-  
hangi bir izotopa ait değer; çekirdek-



ten bir çekirdekçik koparmak için ge-  
reken veya çekirdeğe bir çekirdekçik  
daha eklendiğinde açığa çıkan enerji  
olmak üzere, iki şekilde yorumlana-  
bilir. Grafikten anlaşıldığı üzere, do-  
ğadaki en sağlam çekirdekler, demir  
grubu izotoplarına ait.  ${}^{26}\text{Fe}^{56}$ ,  ${}^{26}\text{Fe}^{58}$ ,  
 ${}^{28}\text{Ni}^{62}$  izotopları, çekirdek başına  
8,8 MeV bağ enerjisi ile, en sıkı sıkı-  
ya bağlı çekirdeklere sahip. Çekir-  
dek başına bağ enerjisi, en hafif  
elementlerden başlayarak sağa, en  
ağırlarından başlayarak da sola doğ-  
ru, demire yaklaşıldıkça artıyor. Bu-  
na göre, demirin sol tarafında; iki ha-  
fif çekirdeğin kaynaşarak daha bü-  
yük ve fakat demirden küçük bir çe-  
çirdek oluşturması halinde, çekirdek-  
çik başına bağ enerjisiyle birlikte,  
toplam bağ enerjisi artar. Dolayısıyla,  
kütle azalır. Toplam bağ enerjisinde-

ki artışa eşdeğer olan bu kütle azal-  
ması, enerji olarak açığa çıkar. Demir-  
in sağ tarafında ise, ağır bir çekirde-  
ğin, orta ağırlıkta iki çekirdeğe par-  
çalanması halinde; çekirdek başına  
bağ enerjisiyle birlikte, toplam bağ  
enerjisi artar; kütle azalır, enerji  
açığa çıkar. Çekirdek kaynaşmasına  
'füzyon', parçalanmasına da 'fizyon'  
denir. Her iki durumda da, açığa çı-  
kan enerji miktarı, çekirdek başına  
bağ enerjisi, yani MeV düzeyinde-  
dir. Kimyasal tepkimelerde açığa çı-  
kan eV düzeyindeki enerjilerin mil-  
yon katı kadar...

Bu grafik aynı zamanda, element-  
lerin nasıl oluşmuş olabileceği hak-  
kında da önemli ipuçları verir. Çün-  
kü, küçük çekirdeklerin kaynaşması,  
demire kadarki elementleri üretebi-  
lidir. Kaynaşmalar bir kez başladığın-  
da, füzyondan enerji açığa çıktığına  
göre, kendiliğinden devam edebilir.  
Halbuki ağır çekirdeklerin oluşumu,  
parçalanmalarından enerji açığa çık-  
tığına göre, dışarıdan enerji gerekti-  
rir. O halde, uygun koşullar yakalan-  
dığı takdirde; küçük çekirdekler kay-  
naşarak demire kadarki elementleri  
üretirken, demirden sonraki element-  
leri üretmek için dışarıdan enerji ge-  
reker.

## Kuvvetler

Doğada bilinen dört tür etkileşme var; güçlü kuvvet, elektromanyetik kuvvet, zayıf etkileşim ve kütleçekimi. En şiddetli etkileşim, çekirdeği bir arada tutan güçlü kuvvet. Fakat menzili kısa, çekirdek boyutunun ötesinde etkili olamıyor. Zayıf etkileşim, adı üzerinde, şiddeti zayıf olduğu gibi; keza çekirdek boyutunda, güçlü kuvvetinkinden daha bile kısa bir menzile sahip. Radyoaktif çekirdeklerin bozunmasından ve nötrinoların tür değişiminden sorumlu. Günlük yaşamdan tanışık olduğumuz elektromanyetik kuvvet ve kütleçekimi ise, uzaklığın karesiyle ters orantılı bir şekilde hızla azalmalarına rağmen, sonsuz erimliler. En zayıf etkileşim, kütleçekimi. Şiddet sıralamasında, güçlü kuvvet, elektromanyetik kuvvetin 137, zayıf etkileşimin 100.000, kütleçekiminin de  $10^{38}$  katı.

Kuvvet terimi, iki parçacık arasındaki itme veya çekmenin varlığını ve güçlülük düzeyini betimler. Ancak genellikle, örneğin Dünya'nın kütlesiyle Ay'ı çektiği söylenirse de, bunu nasıl becerdiğinden pek söz edilmez. Onca mesafeyle ayrılmış bulunan bu iki kütlelerin birbirini çekmesi, bir bakıma 'uzaktan eylem' niteliği taşır ve çoğu zaman bir sır perdesinin ardında kalır. Halbuki etkileşimlerin işleyişi, iki insanın birbirine top atıp tutarken sendeleyip birbirinden uzaklaşmasına veya kement atıp çekiştirirken birbiri-

ne yaklaşmasına benzetilebilir. Yani, arada 'etkileşimin taşıyıcı'lığı yapan bazı unsurların var ve alışverişinin yer alıyor olması gerekmektedir. Her etkileşim türü için farklı olan bu parçacıklara 'taşıyıcı bozon' deniyor. Örneğin elektromanyetik kuvvetin taşıyıcısı, oldukça tanışık olduğumuz foton. Güçlü kuvvetin taşıyıcıları, Standart Model'e göre, 8 çeşit 'gluon'. Bunlar çekirdekçiği, yani proton veya nötronu oluşturan kuark üçlülerini bir arada tutuyorlar. Çok güçlü yapıştırıcılar. Çünkü, bir çekirdekçiğin kütlesinin %2'den azı içindeki üç kuarkın kütlesinden, kalan %98'den fazlası ise kinetik enerjilerinden oluşuyor. Yani, çekirdekçiğin içindeki kuarklar çılgınca hareket halinde. Buna rağmen, gluonların bağlayıcılığından kurtulup kaçamıyorlar. Ancak, gluon alışverişi,  $10^{-15}$  m'den sonra etkinliğini kaybediyor. Halbuki çekirdekçiğin boyutu, tam bu düzeyde. Yani, gluon alışverişi çekirdekçiğin hemen dışında sona eriyor. Bu durumda; çekirdekçikler birbirlerine dokunurcasına yakinken, gluon alışverişi kalıntılarından yararlanabiliyor. Fakat, çekirdekçikler sürekli hareket halinde, titreşip duruyorlar. Öte yandan çekirdeğin yarıçapı  $10^{-14}$  m düzeyinde olup, çekirdekçik boyutunun onlarca katını bulabilmekte. Dolayısıyla, çekirdekteki çekirdekçikler birbirlerine çoğu zaman, gluon eriminin ötesinde birer uzaklıktalar. Onları asıl bir arada tutan, ek bir mekanizmanın daha var olması la-

zım. Nitekim, gluonlar çekirdekçiğin dışına çıkamıyor, ama dışında, kuark ikililerinden oluşan 'pi mezon'lara yol açabiliyor ve çekirdeği bir arada tutan, bu mezonların nötronlar ve protonlar arasındaki alışverişini. Nihayet; zayıf kuvvetin taşıyıcıları  $W^+$ ,  $W^-$ ,  $Z^0$  bozonları, kütleçekimininki ise 'graviton'. Bu sonuncusu henüz gözlenmedi. Belki de hiç gözlenemeyecek.

Toparlayacak olursak; evrenin çekirdek boyutlarındaki küçük ölçekli 'mikro' yapısını, şiddeti büyük ve fakat erimi küçük olan güçlü kuvvet yönetiyor. Bu küçük ölçekte, sırasıyla elektromanyetik ve zayıf etkileşimler, ikincil de olsa önemli bir rol oynayabilmekte. Şiddeti zayıf etkileşiminkinden bile çok daha düşük olan kütleçekiminin ise, mikro ölçekteki etkisi yok denecek kadar az. Elektromanyetik kuvvet, daha ziyade atom ve moleküllerini bir arada tutarak, mikro ve makro ölçekler arasında köprü kuruyor. Fakat, yıldızlar ve gökadalara gibi büyük ölçekli cisimler genelde nötür olduklarından, bu kuvvetin etkisinde değiller. Sonuç olarak evrenin, yıldızlar ve gökadalara gibi büyük ölçekteki yapısını belirleyen yegane kuvvet, etkileşimlerin en zayıfı olan kütleçekimi. Sonsuz erimi sayesinde, gökcisimlerin hareketine, yani evrenin dinamiğine rakipsiz hakim. Kaldı ki o yegane 'kuvvet' de, aslında bir kuvvet değil, belki görüntü; uzay-zamanın eğikliğinden kaynaklanan.

deklarine dönüştüler. Arada,  $2\text{He}^4$  çekirdeklerinin birer  $2\text{He}^3$  veya  $2\text{He}^4$  ile kaynaşması sonucunda, berilyum-7 veya berilyum-8 çekirdekleri oluştu. Ancak bunlar;  $4\text{Be}^7$  çekirdeği 53,12 gün,  $4\text{Be}^8$  ise saniyenin küçük bir kesri ( $<10^{-16}$  s) düzeyindeki yarılanma ömrüyle kararsız olduklarından; bozundular. Dolayısıyla, daha öteye gidilemedi. Lityumdan sonraki elementlerin kararlı izotopları üretilemedi.

Bunun nedeni, kütle numarası 5 veya 8 olan kararlı bir çekirdeğin bulunmaması. O yüzden, bu darboğaza, '5 engeli' deniyor. Halbuki, eğer süreç yeterince uzun süreyle devam edebilseydi;  $4\text{Be}^8$  belli bir konsantrasyona ulaşabilir ve bu kararsız çekirdeklerden hareketle, daha ağır elementlerin kararlı

Kütle numarasına göre kararlı izotoplar	
A	İzotop
1	Hidrojen-1
2	Hidrojen-2
3	Hidrojen-3
3	Helyum-3
4	Helyum-4
5	yok
6	Lityum-6
7	Lityum-7
8	yok
9	Berilyum-9
10	Boron-10

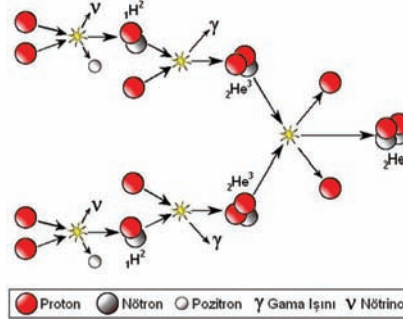
izotopları da sentezlenebilirdi. Fakat, sürecin kısıllığı buna imkan tanımadı. İyi ki de öyle. Tanısaydı eğer, evrenin bugünkü manzarası çok farklı olurdu. Çünkü '5 engeli' aşıldıktan sonra, daha ağır elementlerin sentezi kolayca tamamlanır ve süreç, demir veya nikkelle son bulurdu. Ortada, füzyonla enerji açığa çıkaracak çekirdek kalmazdı. Daha sonra kütleçekiminin etkisi altında oluşan

yıldızlar, ışıyacak güç kaynağını bulamazdı. Hepsi karanlık olurdu; demirden ve nikkelden, kapkaranlık yıldızlar...

Sonuçta, "Büyük Patlama'nın çekirdek sentezi" sürecinden geriye, kararlı çekirdekler olarak; kütlece yaklaşık %75 hidrojen-1, %25 helyum-4, %0,01 döteryum ve  $10^{-10}$  düzeyinde eser miktarlarda da lityum-6 ve 7 (%7,5 - 92,5 oranında) kalmıştı. Bu çekirdeklerle, 'evrenin ilk oluşumundan kalma' anlamında, 'ilksel' ('primordial') çekirdekler deniyor. 400.000 yıl kadar sonra sıcaklık 3000 K'e (0,26 eV) indiğinde, bu çekirdekler elektronlarla birleşerek atomları oluşturdular. Bundan sonra, madde yer yer toplanmaya, ilk yıldızlar oluşmaya başladı. 13 mil-

yar yıl sonra, bizler evrene bakarken hâlâ, hemen hemen aynı oranları görüyoruz: Atomların yaklaşık %75'i hidrojen, %23'ü helyum-4, sadece kalan %2'den azı diğer elementlerden oluşmakta. Bu sonuncusu, %2; yıldızların yaşam ve ölüm süreçlerinde oluştu. Çünkü, oluşan ilk yıldızlar, yaşamları sırasında '5 engeli'ni aşmayı başardılar (Bkz. Yıldızlar).

**Yıldızlarda sentez:** İlk nesil yıldızlarda yer alan ve 'proton-proton zinciri' denilen tepkime zincirinde, dört adet hidrojen, bazı ara aşamalardan geçirilerek kaynaştırıldı ve tek bir helyum-4 çekirdeğine dönüştürüldü. Zincirin birinci aşamasında; iki proton çarpışarak bir döteryum çekirdeği oluştururken, bir pozitronla bir nötrino salınır ( $1H^1+1H^1 \rightarrow 1D^2+e^++\nu_e$ ). Pozitron daha sonra bir elektron tarafından yok edilerek enerjiye dönüşür. İkinci aşamada; döteryum çekirdeği bir başka protonla kaynaşır, He-3 çekirdeği oluşturur ve bu sırada bir gama fotonu ışıır ( $1D^2+1H^1 \rightarrow 1He^3+\gamma$ ). Üçüncü aşamada ise; ilk iki aşamayla oluşturulmuş olan iki He-3 çekirdeği çarpışır ve bir He-4 çekirdeği oluşur-



ken, 2 proton açığa çıkar ( $2He^3+2H^3 \rightarrow 2He^4+p+p$ ).

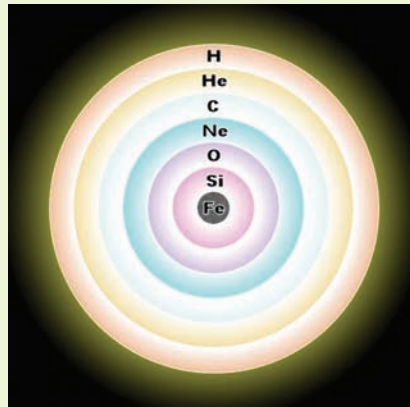
He-4'ten sonraki elementlerin sentezinde, '5 engeli' var. Çünkü, kütle numarası 5 veya 8 olan kararlı bir çekirdek yok. Dolayısıyla, He-4'ün bir protonla veya bir başka He-4 çekirdeğiyle kaynaşması, kararsız birer yapıyla sonuçlanır. Örneğin, iki He-4'ün kaynaşmasıyla oluşan berilyum-8,  $10^{-16}$  saniyede dağılır. Ancak, yıldız yeterince büyük kütleli ve oluşan He-4 konsantrasyonu yeterince yüksek ise, ortamda bir miktar Be-8 konsantrasyonu oluşur. Bu çekirdeğin enerji düzeyleri, bir He-4'le daha kaynaşma 'rezonans'ına girerek C-12 oluşturmaya uygundur. Tepkimenin gerçekleşme ola-

sılığı, kırmızı dev veya süperdevlerin son aşamalarında merkez sıcaklığı 100 MK'i aşınca artar. Sonuç olarak üç He-4 çekirdeğini kaynaştıran bu süreç, 'üçlü alfa süreci' deniyor. '5 engeli' bu sayede aşılar. İzleyen proton yutmaları ve pozitron bozunmalarıyla, nitrojen ve oksijenin, diğer çekirdek kaynaşmalarıyla da; silikon, kükürt ve demir elementlerinin izotopları sentezlenir. Demirden sonraki elementler, dışarıdan enerji gerektiren 'endotermik' tepkimelerdir. Dolayısıyla, ya süperdev yıldızların dış katmanlardaki orta kütleli çekirdeklerin, merkezdeki füzyon tepkimelerinden açığa çıkan nötronlar tarafından bombardımanıyla, ya da yakıtı tükenen büyük yıldızların dış katmanlarının, soğuyan merkez üzerine çöktükten sonra geri sekmesiyle gerçekleşen ve 1-2 saniye süren süpernova patlamaları sırasında üretilir (bkz. süpernova). Bu patlamalar çok şiddetli seyreden süreçler olduklarından, olası her türlü izotopu üretirler. Kararsız olanlardan, yarılanma ömrü kısa olanlar, zamanla yok olur. Uzun yarılanma ömürlü olanlar ise, oluşumlarından itibaren bozunmaya devam etmekle bir-

## Yıldızlar

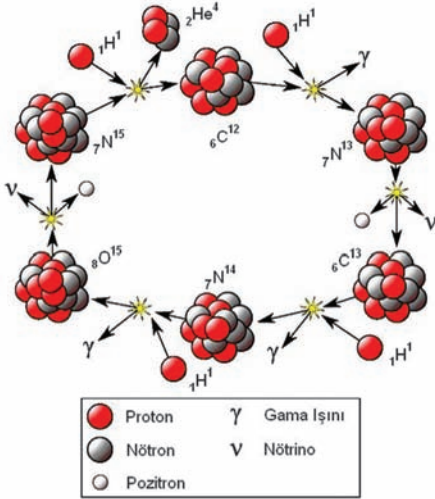
Yıldızlar hidrojen bulutlarının, örneğin bir şok dalgasıyla sarsılmasıyla başlayan kütle toplanmaları sonucunda nüvelenir. Özellikle, hidrojenin iyonlaşmış halde olduğu H II denilen bölgelerinde... Nüve, etrafındaki hidrojen bulutunun ne kadar büyük bir kısmını çekip kendine bağlayabilirse, kütlesi o kadar büyük olur. Küresel bir şekle bürünen gaz topağı, kendi üzerine çöker ve kütleçekimsel potansiyel enerjisinden harcayarak, merkez kısmı sıkıştırıp ısıtır. Merkez 10-15 milyon Kelvin sıcaklığa ulaştığında, hidrojen çekirdekleri, olası iki süreçten biri veya ikisiyle kaynaşır (p-p, CNO) helyum üretmeye başlar. Yeni doğan yıldız, yaşamının hemen tamamını oluşturacak olan kütleyle ters orantılı olarak 10 milyar yılı aşabilen 'anakol evresi'ne girmiştir. Bu uzun süreli evreyi ayakta tutan, merkezdeki yüksek basıncın, dış katmanların çöküşüne karşı direnişidir. Ancak, kütleçekimi pusuya yatmış olup, devamlı fırsat kollamaktadır. Helyum çekirdekleri görece ağır ol-

duklarından, dibe çökmekte ve halen enerji üretimine katkıda bulunmadıklarından, merkezi bir bakıma 'kirlenmek'tedir. Helyum sayısı arttıkça, merkezdeki toplam parçacık sayısıyla birlikte, basıncın da azalması beklenir. Fakat, sürekli tetikte kütleçekimi, merkez kısmı devamlı sıkıştırır. Yıldızın yaşı ilerledikçe; dış katmanlar merkeze doğru ilerlemekte, merkezdeki 'gaz'ın üzerinde yaptıkları iş aracılığıyla basıncını ve sıcaklığını yükseltmektedirler. Sıcaklık 100 milyon Kelvin'e ulaştığında, merkezdeki helyum çekirdekleri kaynaşmaya ve üçlüler halinde



birleşip, karbon çekirdekleri oluşturmaya başlar. Bu arada, merkezin hemen dışındaki katmandaki basınç ve sıcaklık, hidrojen füzyonunu başlatacak düzeye ulaşmıştır. Sonuç olarak; iç kısımda helyum, hemen dışında da hidrojen yakan bir katman oluşur. İç kısımda üretilen karbon çekirdekleri, daha ağır olduklarından dibe çökmektedir. Sıcaklık arttıkça, karbonlar da aralarında kaynaşır, oksijen üretmeye başlar. Bu durumda, en içte karbon, dışında helyum, onun dışında da hidrojen yakan birer katman oluşmuştur. Yıldız bir soğanınkine benzer katmanlı bir yapıya bürünmektedir. Helyum tükendiğinde, yıldız genişler, bir 'kırmızı dev'e döner ve örneğin Güneş gibi görece küçük kütleli ise, en dış katmanlarını uzaya salar. Geride bir 'beyaz cüce' kalır. Artık enerji üretemeyecek, fakat ısısını ışıtmaya devamla, milyarlarca yıl daha yaşayacaktır. Halbuki büyük kütleli yıldızlar, yakıtlarını daha hızlı tükettiklerinden, daha kısa yaşarlar. Ama daha parlaktırlar. Kısa süren parlak yaşamları, dramatik bir şekilde sona erer. Süpernovalar...

likte, varlıklarını sürdürür ve kararlı izotoplarla beraber, gezegen ya da başka yıldızların oluşumuna katkıda bulunurlar. Dolayısıyla, sonraki nesillere ait yıldızlardan, uygun konumlarda oluşanların yapısındaki ağır element miktarı giderek artar. İlk çekirdeklerin radyoaktif izotopları ise, kısa yarılanma ömürlü olduklarından, çoktan yok oldular. Halen var olanlar, sonradan üretildi.



İkinci nesil yıldızlardan ağır elementlerce fakir olan veya Güneş gibi görece küçük kütleli yıldızların, enerji üretim süreçleri, proton-proton zincirine dayanmak zorundadır. Halbuki, bu zincirin aşamalarının tamamlanması, 1 milyon yıl kadar alır. Bu yüzden, sözkonusu yıldızlardaki enerji üretim süreçleri yavaş çalışır. Halbuki protonları kaynaştırmak için, doğrudan birbirine yaklaştırmaya çalışmak yerine, araya Coulomb kuvvetini seyrelten nötronlar sokarak, dolaylı yollardan kaynaştırmak da mümkündür. Nitekim, ikinci ve daha sonraki nesil yıldızlar, içeriklerindeki ağır elementler sayesinde, hidrojeni yakmanın daha etkin bir yöntemini geliştirdiler. Güneş'ten daha büyük kütleli yıldızlarda baskın olarak yer alan 'karbon-nitrojen-oksijen' (CNO) döngüsü, adı geçen çekirdekleri kullanarak, dört hidrojen çekirdeğini kaynaştırıp, He-4 sentezi yapıyor. Bu arada, iki pozitronla iki nötrino salınmakta ve pozitronlar daha sonra elektronlarla birleşip yok olmaktadır. Döngü, p-p zincirinin 1000 katı hızlı olup, 1000 yılda tamamlanıyor. Dolayısıyla, bu döngüyü ağırlıklı olarak kul-

lanan bir yıldız, daha parlaktır. Fakat, daha büyük olmasına karşın, yakıtını hızla tüketip, ömrünü 100 milyon yıl gibi kısa bir sürede tamamlar. Tepkimeler, katalizör işlevi gören karbon, nitrojen ve oksijen çekirdeklerinin varlığını gerektirir. Ama, bu çekirdekler zaten, ağır elementlerce zengin ikinci veya daha sonraki nesil yıldızlarda vardır veya büyük kütleli yıldızlarda, bir aşamadan sonra üretilirler.

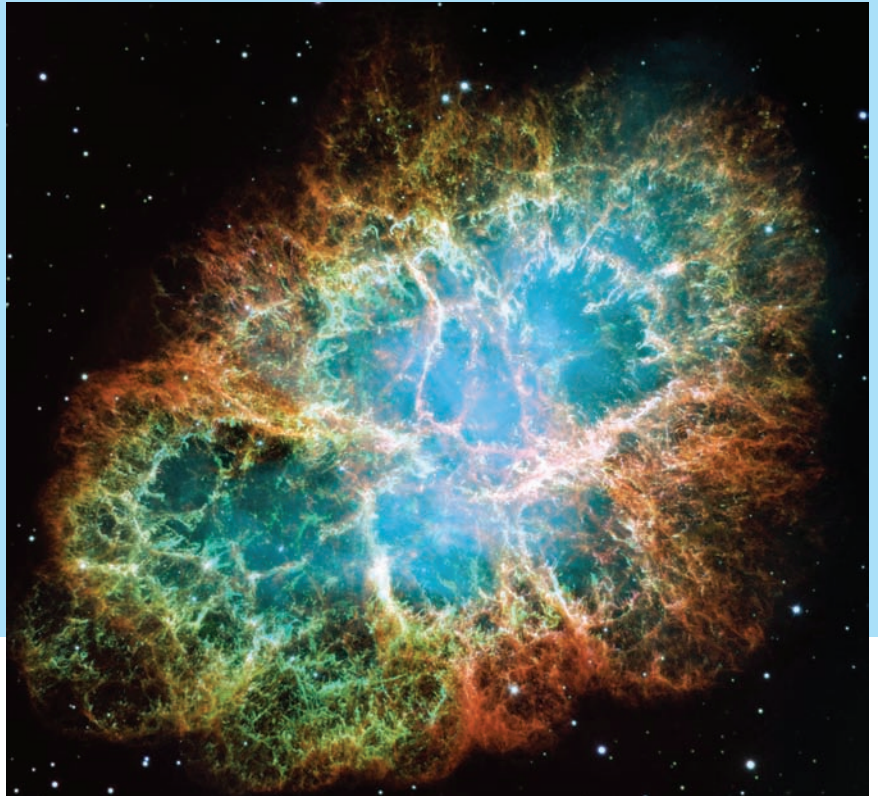
Güneş ise; 'anakol evresi'nin yaklaşık ortalarında bulunan, görece küçük, yeni nesil yıldızlardan birisi... Kütlesinin %74'ü hidrojen, %25'i helyum ve kalanı eser miktardaki diğer elementlerden oluşuyor. Enerji üretimini şimdilik, hidrojen 'yakarak' sağlamakta. Bunu, merkez kısmında  $120 \text{ g/cm}^3$ 'ü bulan yüksek yoğunluk sayesinde,  $10-15 \text{ MK}$  gibi görece düşük sıcaklıklarda başarıyor. %98,3 oranında p-p zincirini, %1,7 oranında da CNO döngüsünü kullanmakta. Saniyede  $3,4 \times 10^{38}$  protonu helyuma, 4,24 milyon ton maddeyi enerjiye dönüştürüyor. Toplam gücü  $3,83 \times 10^{26} \text{ W}$ . Ancak bu gücü, kütlesinin büyüklüğüne borçlu. Çünkü, ortalama güç yoğunluğu, sadece  $0,3$

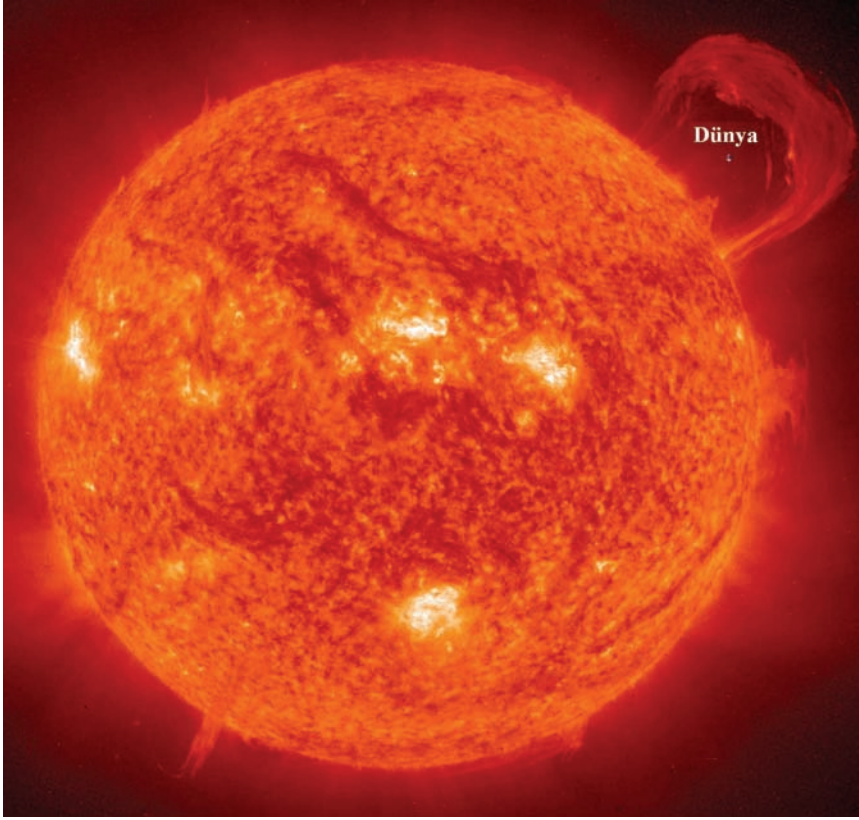
## Süpernova

Yıldızın kütlesi Güneş'inin 10 mislini aşarsa, nükleer yanma helyum tükendikten sonra da devam eder. Dış katmanlar amansız ilerleyişlerini sürdürürken, içteki katmanların basıncı ve sıcaklığı giderek artmaktadır. Yıldız bu haliyle, yanan bir sobadaki kömür yığınınına da benzetilebilir; en alt katmanı en hızlı yanan ve yanan kısımlar kül olup büzülüp, hep birlikte dibe doğru çöker... Yani, genelde sanılanın aksine, merkezde giderek daha ağır elementlerin füzyonunu tetikleyen sıcaklık artışlarını; buradaki füzyon tepkimelerinin ürettiği enerji değil, dış katmanların çökerken merkez kısım üzerinde yaptıkları iş, kütleçekimsel potansiyel enerji sağlar. Yıldızın bütünü giderek büzülür ve ısınırken, dış katmanlar da birer birer, bir alttaki katmanın külünü, yani füzyon ürününü yakmaya başlar. Karbonca zenginleşen merkez kısım büzülerek; karbonu oksijene, sonra neona, silikona, kükürte ve nihayet nikelere dönüştürecek sıcaklıklara ulaşır. Nikel demire bozunur. Merkezde demir birikince,

enerji üretme imkanı ortadan kalkar. Çünkü demir en kararlı çekirdektir; füzyonu da, fizyonu da enerji tüketir. Merkez kısmı, elektronların "Pauli'nin dışlama ilkesi" gereği aynı kuantum durumunu paylaşmayı reddetmelerinden kaynaklanan 'dejenerasyon basıncı' ayakta tutmaktadır. Demir-nikel çekirdeğin kütlesi, Chandrasekhar sınırını, yani

Güneş'inin 1,38 katını aştığında, merkez çökmeye başlar. Oluşan yüksek sıcaklıkta üretilen fotonlar, demir çekirdeklerini helyuma parçalarken, açığa büyük miktarlarda nötron da çıkarmaktadır. Bu enerji çalan bir süreç olduğundan, çöküşü hızlandırır. Artan basınca elektron bulutları da dayanamaz ve çekirdeklerin üzerine çöküp, protonlarla





$\mu\text{W}/\text{cm}^3$  veya  $1 \mu\text{W}/\text{kg}$  kadar. İnsan vücudu ise  $1,2 \text{ W}/\text{kg}$  üretir, Güneş'in milyon katı. Güneş, yakıtını yavaş tü-

ketiyor. İy ki de öyle. Yoksa, şimdiye hepsini çoktan tüketip, beyaz bir cüceye dönmüş olurdu.

birleşirler. Elektronların direnişi ansızın ortadan kalkmıştır. Nötronun kütlesi, protonla elektronun kütlelerinin toplamından daha büyük olduğundan, protonların elektron yakalayıp nötrona dönüşmesi de, keza enerji çalan bir süreçtir. Merkez daha da büzülür ve yarıçap, Dünya'nınki kadardan,  $30 \text{ km}$ 'ye iner; ışık hızının dörtte birine yakın bir hızla. Kütle yoğunluğu,  $\text{cm}^3$  başına 10 milyon tonu aşar. Merkezde bir nötron yıldızının 'öncül'ü ('proto-') oluşmuştur. Desteksiz kalan dış katmanlar, balyoz gibi iner. Merkez kısmın yarıçapı  $10 \text{ km}$ 'ye küçülürken, yoğunluğu atomun çekirdeğindeki iki katına çıkar;  $\text{cm}^3$  başına yarım trilyon ton. Bu durumda, nötronların dejenerasyon basıncı o kadar daha yüksek, çekirdek o kadar dayanıklıdır ki; üzerine ilk ulaşan dış katmanlar, bir futbol topuna çarpan çekiç gibi seker. Daha da kötüsü, geri döndüklerinde; çılgın bir hızla kendilerini takip etmekte olan daha dıştaki katmanlarla yüz yüze gelirler: Üfff! Kabarcıklar şeklinde şok dalgaları oluşur. Merkez kısmı bu sırada, yüksek akımla nötron ( $10^{22} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ) nötron ve büyük bir güçle de

( $10^{46} \text{ W}$ ), yüksek enerjili nötrino ve karışık nötrinolar salmaktadır. Bir iki saniye içerisinde, kütlelerinin %10 kadarını nötrino olarak ıştır.<sup>3</sup> Genelde madde ile etkileşmeye pek eğilimli olmayan nötrinoların aktardığı enerji, şok dalgalarını birleştirip büyütmektedir. Sıcaklığı  $10$  milyar Kelvin'i aşan şok dalgası, merkezin saldırdığı nötronlarla protonları beraberinde sürükler. Dalga, ilerlerken soğur. Sıcaklığı  $10$  milyar Kelvin'in altına indiğinde, çekirdekçikler kaynaşarak alfa parçacıkları oluşturmaya başlamıştır. Alfa parçacıkları birleşerek, orta ağırlıktaki çekirdekleri oluşturur. Sıcaklık  $3$  milyar Kelvin'in altına indiğinde,  $1$  milyar Kelvin'e kadar; bu çekirdekler 'hızlı' ('r-') bir süreçle, art arda nötronlar yutarak, uranyuma kadarki en ağır elementleri üretirler. Şok dalgası yıldız yüzeyinin önce bir tarafına ulaşır, sonra her tarafına yayılır ve kucağındakilerin hepsini boşluğa fırlatır. Bu asimetric gelişme sonucunda, merkez kısım bir nötron yıldızı olarak,  $300-400$  ve hatta  $1000 \text{ km}/\text{s}$ 'ye varan bir hızla uzaya savrulmuştur. Kütleli Güneş'inin  $20$  katından fazla olan yıldızlarda, bu bir karade-

Dolayısıyla, füzyon evrendeki tüm diğer enerji formlarının ana kaynağıdır. Yıldızların oluşum ve yaşam süreçlerinde, hidrojenin ağır çekirdeklerin sentezlenmesi sırasında açığa çıkar ve zamanla diğer formlara dönüşür. Dünyamıza hayat veren güneş ışınlarının kökeni, bu sentez süreçleridir. Elementlerimizi ve verdikleri hayatı da bu süreçlere borçluyuz.

Prof. Dr. Vural Altın

#### Dipnotlar:

<sup>1</sup> Aslında, kuarkların yükü kesirli olup; 'yukarı kuark'ınki  $+2e/3$ , 'aşağı kuark'ınki  $-e/3$ 'tür. Bu sayede; nötronun yükü  $(+2/3)e+(-1/3)e+(-1/3)e=0$ , protonunki  $(+2/3)e+(2/3)e+(-1/3)e=+e$  olur. Ancak, kuarklar çok yüksek enerji düzeylerinde dahi birbirlerinden koparlamaz ve serbest kalamadıklarından, yalnız halde gözlenemezler.

<sup>2</sup> Herhangi bir cismin 'gerçekten' de durağan olup olmadığını, ya da 'aslında' hangi cismin durağan olduğunu belirlemek mümkün değildir. Çünkü, bir cismin durağan olması veya sabit hızla hareket etmesi halleri arasında, fizik yasaları açısından fark yoktur. Ancak, iki cismin birbirine göre hareket edip etmediği, aralarındaki uzaklığın değişip değişmediğine bakılarak belirlenebilir. Dolayısıyla, 'durağan' terimiyle cisimler arasında 'görelî', örneğin 'bize göre durağan' olma hali kastedilir.

<sup>3</sup>  $u.c^2 = 1,66 \times 10^{-27} \text{ kg} \times c^2 = 1,66 \times 10^{-27} \text{ kg} \times (3 \times 10^8 \text{ m})^2 = 1,494 \times 10^{11} \text{ J}$

veya  $1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$  cinsinden;

$u.c^2 = (1,494 \times 10^{11} \text{ J}) / (1,6 \times 10^{-19} \text{ J}) = 0,93375 \times 10^8 \text{ eV} = 933,75 \text{ MeV}$ .

Daha duyarlı değerlerin kullanılması;  $u.c^2 = 931,49 \text{ MeV}$  veya  $u = 931,49 \text{ MeV}/c^2$  değerini verir.

#### Başvuru kaynakları:

<sup>1</sup> Kaufmann, William J, *Universe*, 3rd Edition, W.H. Freeman, 1991.

<sup>2</sup> [WWW Table of Radioactive Isotopes](http://WWW.Table of Radioactive Isotopes).

<sup>3</sup> Woosley, S., Janka, T., *The Physics of Core-Collapse Supernovae*, Aralık 2005, *Nature Physics* 1 (3): 147-154.

liktir. Yıldız bu şiddet dolu ölümü sırasında, bir ay kadar süreyle, milyar yıldızlık bir gökadan daha parlak ışıldar. Dağılan kütle uzaya, içeriğindeki ağır elementleri yayar ve karşılaştığı bulutsularda yol açtığı sarsıntılarla, yeni yıldızların oluşumunu tetikler.

Bu, merkez çökmesi sonucunda gerçekleşen bir süpernova patlaması (Tip II, Ib, Ic vb). Bir de ikili yıldız sistemlerinde, beyaz cüce aşamasına ulaşmış olan bir yıldızın, kırmızı dev aşamasındaki daha iri kütleli eşinden malzeme çalarak, Güneş'in kütlelerinin  $1,38$  katını (Chandrasekhar sınırı) aşmasıyla gerçekleştiği düşünülen süpernovalar var (Tip Ia). Ya da iki beyaz cücenin karşılaşır birleşmesiyle... Farklı süpernova tiplerini birbirinden, ışımaya gücünün zaman değişimi ve uzaya saçtıkları elementlerin bileşimine bakarak ayırmak mümkün. Görece genç bir kırmızı devin, için için yanmakta olan yaşlı eşinin üzerine benzin dökmesine benzeyen Ia tipi süpernova patlamalarının, belli bir kütle ile başladıklarından, ışımaya güçlerinin aynı olması gerektiği düşünülmekte. Bu nedenle, iyi bir 'standart kandil' oluşturdukları sanılıyor.