

Erken Evren

Atomun keşfi MÖ 460'lara uzanmaktadır. Demokritos maddenin bölünemez bir parçası olduğunu öne sürmüştü ve buna "bölünemez" anlamına gelen "atomus" adını vermiştir. Teknolojinin gelişmesiyle 1800'lerde parçacıklardan oluştuğu anlaşılmıştır. 1897'de Thomson elektronu, 1919'da Rutherford protonu ve 1932'de Chadwick nötronun varlığını keşfetmiştir. Yine bu dönemde foton, pozitron ve nötrinonun da varlığı bilinmektedir.

Atomaltı parçacıkların yaşam süreleri $10^{-6} - 10^{-20}$ saniyedir. Doğrudan gözlenemezler, ancak özel ortamlardaki etkileşimleri gözlemlenebilir (1912 Sis odaları, 2008 Büyük Hadron Çarpıştırıcısı (300 parçacık tespit edilmiştir)). Hızlandırıcı deneyleri, Evrendeki fiziksel süreçlerin $t \sim 10^{-9}$ saniyede yani sıcaklık 10^{15} K'e düştüğünde meydana geldiğini göstermektedir. Atomaltı parçacıkların etkileşimleri **temel parçacıkların standart modeli** olarak adlandırılan kuantum fiziğinin bir kolu ile ifade edilmektedir. Genel görelilik teorisi, Newton'un çekim teorisi ile açıklanamayan etkileri açıklamaktadır ve gözlemler de görelilik teorisinin yanlış olmadığını göstermektedir. Ancak standart model test edilmeye daha uygundur ve laboratuvar ortamında da test edilebilir. İki teori de doğadaki temel etkileşimleri yeteri kadar iyi açıklayamamaktadır. Bu nedenle henüz keşfedilmemiş olan **herşeyin teorisi** olarak adlandırılan birleşik bir teori önerilmektedir.

Böyle bir teoriye, Evren 10^{-43} saniyeden daha yaşlıyken oldukça sıra dışı şartlar altında meydana gelen süreçleri anlamak için ihtiyaç duyulmaktadır. Bu limit **Planck zamanı** olarak bilinmektedir. Bu zaman, bir fotonun ışık hızında, uzay-zamanın ve kütle çekimin geçersiz olduğu, ancak kuantum etkilerinin baskın olduğu ölçü olan **Planck uzunluğunu** ($l_{planck} = 1.6 \times 10^{-35}m$) katetmesi için geçen zamandır. Bu terim şimdiki fizik teorileri kullanılarak $t = 0$ 'a doğru ne kadar geriye gidilebildiğinin sınırını vermektedir.

$$t_{planck} = \left(\frac{Gh}{2\pi c^5} \right)^{0.5} = 5.38 \times 10^{-44} \text{ saniye}$$

Erken Evrende yüksek sıcaklıklarda Evrenin parçacıklar açısından kompozisyonu, parçacık etkileşimlerinin enerjilerinden elde edilmektedir.

$$E \sim kt$$

$$\text{Boltzman sabiti } k = 1.38 \times 10^{-23} JK^{-1}$$

$$1 \text{ eV} = 1.60 \times 10^{-19} J$$

$$1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$$

$$1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$$

SORU: $T = 10^4 K$ iken etkileşim enerjisini GeV biriminde hesaplayınız.

CEVAP:

$$E \sim kt \implies 1.38 \times 10^{-23} JK^{-1} \times 10^4 K = 1.38 \times 10^{-9} J$$

$$= 1.38 \times 10^{-9} J / 1.60 \times 10^{-19} J$$

$$= 8.63 \times 10^9 eV = 8.63 GeV$$

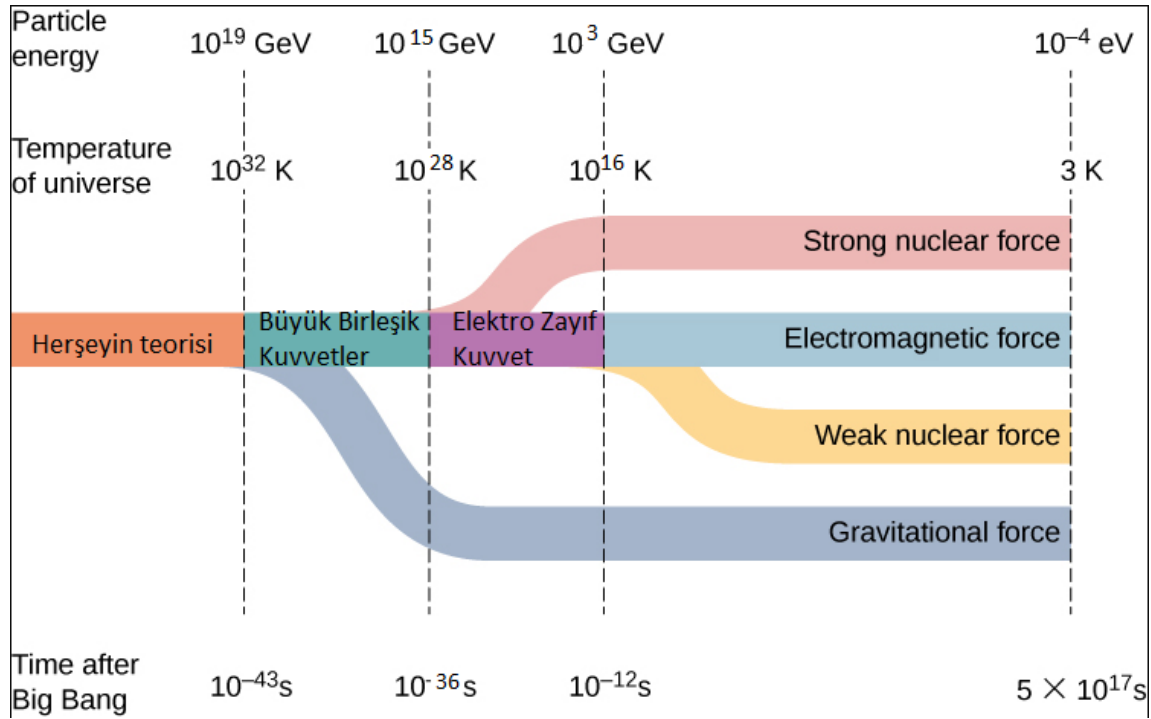
Doğadaki tüm parçacıklar birbirleriyle dört temel kuvvetten en az biri aracılığıyla etkileşmektedirler.

- 1- Güçlü Çekirdek Kuvveti
- 2- Elektromanyetik Kuvvet
- 3- Zayıf Çekirdek Kuvveti
- 4- Kütle Çekim Kuvveti

Bu kuvvetler büyükten küçüğe doğru $1 > 2 > 3 > 4$ olarak sıralanmaktadır.

Temel Kuvvetlerin Özellikleri

<p style="text-align: center;">Güçlü Nükleer Kuvvet</p> <ul style="list-style-type: none"> • Kısa menzillidir • Nötron ile protonu bir arada tutar • En güçlü kuvvettir • Sürekli vardır • Kuvvet taşıyıcı parçacığı "gluon" dur. 	<p style="text-align: center;">Elektromanyetik Kuvvet</p> <ul style="list-style-type: none"> • Uzun menzillidir • Atom ve moleküllerin bağlanmasını sağlar • Kuvvet açısından 2. Sıradadır • Sürekli vardır • Kuvvet taşıyıcı parçacığı "foton" dur.
<p style="text-align: center;">Zayıf Çekirdek Kuvveti</p> <ul style="list-style-type: none"> • Çok kısa menzillidir • Kararsızlığı üretmeye çalışan bozunmalardan sorumludur • Kuvvet açısından 3. Sıradadır • Bozunma sırasında vardır (β^- bozunması) • Kuvvet taşıyıcı parçacığı "W^-, W^+ ve Z^0 bozonları" dır 	<p style="text-align: center;">Kütle Çekim Kuvveti</p> <ul style="list-style-type: none"> • Uzun menzillidir • Atom ve moleküllerin bağlanmasını sağlar • Kuvvet açısından 4. Sıradadır • Sürekli vardır • Kuvvet taşıyıcı parçacığı "graviton" dur.



Evrenin ilk anlarında temel etkileşimlerin davranışı şu şekilde özetlenebilir;

- $t = 10^{-43}$ saniyeye kadar 4 temel kuvvet birleşik halde olabilir
- Bu andan sonra çekim kuvveti **büyük birleşik** kuvvetlerden ayrılır
- $t = 10^{-36}$ saniyede güçlü çekirdek kuvveti ve elektrozayıf kuvvet ayrılır
- $t = 10^{-12}$ saniyede etkileşim enerjisi 1000 GeV olduğunda zayıf ve elektromanyetik kuvvetler ayrılır ve temel kuvvetler günümüzdeki halini alır.

Atomaltı Parçacıkların Sınıflandırılması

Standart modele göre parçacıklar; **Temel Parçacıklar** ve **Etkileşim Parçacıkları** olmak üzere iki ayrılır.

Temel Parçacıklar (Fermiyonlar)		Etkileşim Parçacıkları (Bozonlar)
Kuarklar	Leptonlar	
1- Up (u) 2- Down (d) 3- Charm (c) 4- Strange (s) 5- Top (t) 6- Bottom (b)	<ul style="list-style-type: none"> • Elektron (e) • Müon (μ) • Tau (τ) • Elektron nötrino (ν_e) • Müon nötrino (ν_μ) • Tau nötrino (ν_τ) 	1- Gluon 2- Foton 3- W ve Z bozonları 4- Graviton

Kuarklar

- Hadron ailesinin temel taşıdır.
- 3 kuark bir araya gelerek baryonları oluşturur (proton: uup; nötron: udd)
- Kuarklar asla tek başlarına gözlenmezler
- Dört temel kuvvetin tümüyle etkileşebilen tek atomaltı parçacıktır

Leptonlar

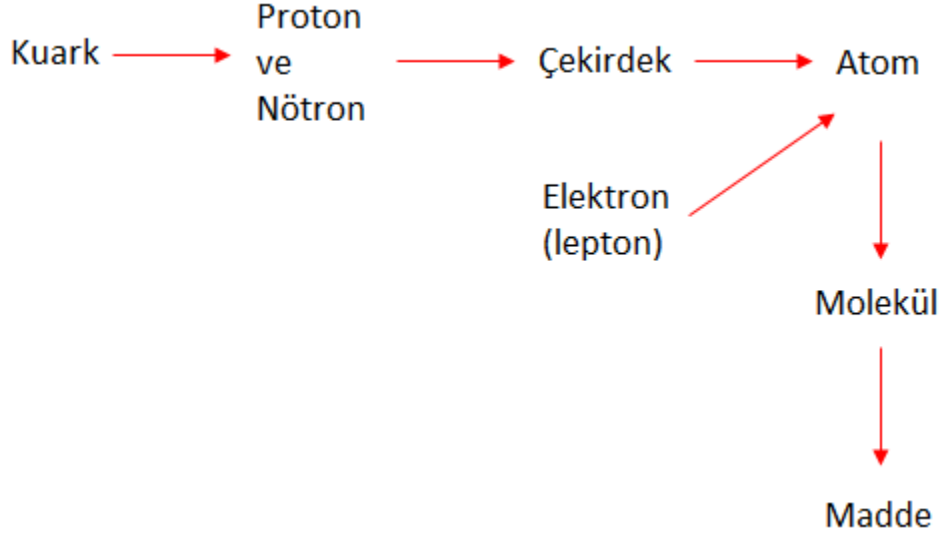
- İki temel grupta incelenir: yüklü (elektron, müon, tau) ve nötr olan (nötrinolar) leptonlar
- Bunların en ünlüsü elektrondur. Elektron en kararlı leptonudur.
(NOT: diğer kararlı atomaltı parçalar proton, nötrino ve fotondur)
- Diğer yüklü leptonlar olan müon (μ) ve tau (τ), elektrona göre daha büyük kütlelidirler.
- Kozmik ışımalarda veya yüksek enerjili hızlandırıcı çarpışmalarında gözlenir.

Hadronlar

- Güçlü nükleer kuvvetle etkileşen ve bundan sorumlu olan parçacıklardır
- Yüklü olmak şartıyla elektromanyetik kuvvetler aracılığıyla etkileşime girebilirler
- Parçacık ailesinin en büyük grubudur
- **Baryonlar** ve **mezonlar** olarak ikiye ayrılırlar

Baryonlar (kkk) (3 kuark)	Mezonlar ($k\bar{k}$) (1 kuark ve 1 antikuark)
<ul style="list-style-type: none">1- Proton2- Nötron3- Sigma (Σ)4- Lambda (Λ)5- Ksi (Ξ)6- Omega (Ω)• En büyük kütleli grup• Madde parçacığı• Proton en az kütleli sahip baryon• Proton tek kararlı olan baryon (bozunmaz)• Hepsi bozunup son ürün olarak proton oluşur	<ul style="list-style-type: none">1- Pion (π)2- Kaon (κ)• Orta kütleli parçacıklar• Parçacık ve antiparçacık yapısında olduklarından kararsızdırlar• Hepsi sonunda elektrona, pozitrona, nötrinoya ya da fotona bozunur

Atomlardan Madde Oluřturma



SORU: (a) Büyük birleşme için gereken minimum etkileşim enerjisine karşılık gelen sıcaklık nedir?
(b) Güçlü ve elektrozaıf etkileşimler birbirinden ayrıldıkları anda Evren kaç yaşındadır?

CEVAP: Büyük Birleşmenin meydana geldiği etkileşim enerjisi 10^{15} GeV'tur. Dolayısıyla güçlü ve elektrozaıf etkileşimler bu değerin altındaki enerjiler için birbirinden ayrılacaktır.

(a)

$$T \sim \frac{E}{k}$$

$$T \sim \frac{10^{15} \times 10^9 eV \times 1.60 \times 10^{-19} J/eV}{1.38 \times 10^{-23} JK^{-1}}$$

$$T \sim 1.16 \times 10^{28} K$$

→ Büyük Birleşmenin meydana geldiği sıcaklık

(b)

$$t \sim \left(\frac{1.5 \times 10^{10}}{T} \right)^2$$

$$t \sim \left(\frac{1.5 \times 10^{10}}{1.16 \times 10^{28}} \right)^2 = 2.25 \times 10^{-36} \text{ saniye}$$

Etkileşim enerjisinin çok yüksek olduğu anda meydana gelen önemli bir süreç, parçacık ve antiparçacıkların eş zamanlı olarak çiftler halinde oluşmasıdır. Bu süreç **çift oluşumu** olarak adlandırılmaktadır ve erken Evrenin kompozisyonunda önemli bir yere sahiptir. Bu oluşumda uyulması gereken korunum kuralları vardır;

- Korunumlu nicelikler enerji, elektrik yükü, baryon ve lepton sayılarıdır.
- Bir etkileşimde enerji, hangi parçacığın oluşacağına belirlenmesi için önemlidir.
- $E \geq mc^2$ ile verilen **kütle enerjisini** geçen enerjilerde m kütleli bir parçacık oluşabilir.

Örneğin $t \sim 10^{12} s$, $T \sim 10^{16} K$ için enerji değeri 1000 GeV'tur. Bu değer bir fotonun veya parçacığın enerjisidir. Dolayısıyla her etkileşim yeni parçacık oluşturmak için 1000 GeV enerji sağlamaktadır. Bu enerji tüm kuarkların ve leptonların kütle enerjisinden yüksektir. Sonuç olarak, bu dönemde Evrenin madde içeriği her tür lepton, kuark ve bunların antiparçacığını içermektedir.

Lepton sayısı, leptonları içeren etkileşimlerde korunumlu niceliktir. Etkileşimlerde leptonlara +1, antileptonlara -1 değeri verilir. Lepton olmayan parçacıklar için 0 verilir. Aynı durum baryonlar için de geçerlidir.

SORU: Serbest bir nötronun, bir proton, bir elektron ve bir elektron nötrinosuna dönüştüğü düşünülürse; $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$

- (a) Süreçten önceki ve sonraki baryon sayıları ne olur? Bu reaksiyon için baryon sayılarının korunduğunu gösteriniz.
- (b) Süreçten önceki ve sonraki lepton sayıları ne olur? Bu reaksiyon için lepton sayılarının korunduğunu gösteriniz.
- (c) Hangi kuark kombinasyonu bir nötron ve bir proton oluşturur?

CEVAP: $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$

- (a) $+1 \rightarrow +1 + 0 + 0$ etkileşime giren ve çıkan baryon sayısı eşit. Korunumlu bir etkileşim.
- (b) $0 \rightarrow 0 + 1 + (-1)$ etkileşime giren ve çıkan lepton sayısı eşit. Korunumlu bir etkileşim.
- (c) $nötron \rightarrow udd$ $proton \rightarrow uud$

SORU: Eğer iki foton etkileşime girerse ;

$$\gamma + \gamma \rightarrow \text{parçacıklar}$$

bu etkileşimde iki fotonun toplam lepton sayısı ve toplam baryon sayısı ne olur?

CEVAP: Fotonların lepton ve baryon sayısı 0'dır. Bu nedenle toplam lepton ve toplam baryon sayısı da 0 olur.

Lepton ve baryon sayıları korunduğu için iki foton etkileştiğinde baryon ve lepton sayısı 0 olan ürünler oluşur. Bu, her üretilen parçacığın lepton ve baryon sayısı 0 olacak anlamına gelmemektedir. Sadece lepton ve baryon sayılarının toplamı 0 olmalıdır. Örneğin elektron (lepton +1) ve pozitron (antilepton -1) üreten bir etkileşim olabilir.

$$\gamma + \gamma \rightarrow e^- + e^+$$

Bu etkileşimde baryon sayıları 0 olduğu için baryon sayıları da korunur. Çift oluşumu tersine çevrilebilir. Yani bir pozitron ve bir elektron iki foton üretebilir.

$$e^- + e^+ \rightarrow \gamma + \gamma$$

Bu süreç, parçacık ve antiparçacığın etkileşerek yok olması yani **anihilasyon** veya **yok oluş** olarak adlandırılır.

SORU: (a) Bir elektron ve pozitron çiftinin üretilmesi için gereken minimum etkileşim enerjisi nedir? (*elektron için etkileşim enerjisi $m_e c^2 = 0.511 \text{ MeV}$*)

(b) Bu enerji için gereken sıcaklık nedir?

CEVAP: (a)

$$E = 2m_e c^2 = 2 \times 0.511 \text{ MeV}$$
$$= 1.02 \text{ MeV} = 1.02 \times 10^6 \text{ eV}$$

(b)

$$E = kT$$

$$T = \frac{1.02 \times 10^6 \text{ eV} \times 1.60 \times 10^{-19} \text{ J}}{1.38 \times 10^{-23} \text{ JK}^{-1}}$$
$$= 1.18 \times 10^{10} \text{ K}$$

Erken Evrendeki Dönemler

Planck Dönemi ($t < 10^{-43} \text{ s}$, $T > 10^{32} \text{ K}$, $E > 10^{19} \text{ GeV}$)

- Planck dönemindeki süreçleri tanımlamak için herhangi bir fiziksel teori yok.
- Planck zamanından önceki dönemlerde temel kuvvetler benzer güçlere sahiptir.
- Bu dönemde Evrenin aşırı derecede sıcak ve yoğun bir durumda olduğu varsayılmaktadır.

Şişme ve Büyük Birleşmenin Sonu ($t < 10^{-36} \text{ s}$, $T \sim 10^{28} \text{ K}$, $E \sim 10^{15} \text{ GeV}$)

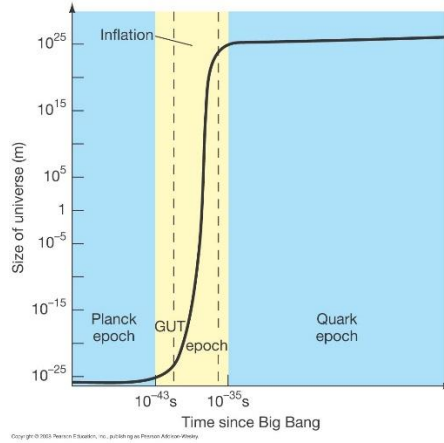
- Evren bu yaştaiken güçlü ve elektrozayıf kuvvetlerin birleştiği yüksek enerji durumu sona ermiştir. Bundan sonra, bu iki kuvvet birbirinden ayrılmıştır.
- Bu dönemde, boşluğun farklı ve önemli ölçüde yüksek enerji yoğunluğuna sahip olduğu düşünülmektedir. Kısa bir süre içinde bu vakum enerjisi günümüze gözlenen değere kadar azalmıştır. Ancak bu arada ciddi değişimlere neden olmuştur.

- Buna göre vakumun enerji yoğunluğunun yüksek bir değeri, kozmolojik sabitin yüksek bir değeriyle aynı fiziksel etkiye sahiptir.
- Kozmolojik sabitin önemli bir rol oynadığı model, de Sitter modelidir ve

$$R \propto e^{Ht} \rightarrow H = \sqrt{\frac{\Lambda c^2}{3}}$$

ile verilir.

- Bu modelde ölçek faktörü üstel olarak artmaktadır.
- Vakum enerjisinin yüksek olduğu dönemde, $t \sim 10^{-36} s$ 'den $t \sim 10^{-34} s$ 'e kadar olan zaman aralığında Evren üstel bir genişlemenin olduğu bir döneme girmiştir.
- Bu zaman süresince ölçek faktörü inanılmaz bir miktarda artmıştır.
- Bu değer en az 10^{27} olarak verilmektedir.
- Bu dramatik genişleme evresi **şişme veya enflasyon** olarak bilinmektedir.



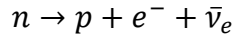
- Şişme senaryosunun Evrendeki madde içeriği açısından önemli bir sonucu vardır.
- Şişme dönemi sona geldiğinde, vakum enerjisi günümüzdeki seviyesine dönmüştür.
- Bu dönüşüm enerjinin serbest kalmasına ve parçacık – antiparçacık çiftlerinin oluşmasına yol açmıştır.
- Şişme modeline göre Evrendeki parçacıkların çoğu şişmenin sonunda salınan enerjiden üretilmiştir.
- Sonuç olarak tüm bozonlar, kuarklar ve leptonlar (ve bunların antiparçacıkları) oluşmuştur.
- Ayrıca parçacık ve antiparçacık sayıları tam olarak eşit değildi.
- Madde ve antimadde arasındaki bu küçük eşitsizlik günümüzde meydana gelen fiziksel süreçlerin başlangıcıdır.
- Dolayısıyla büyük Birleşmenin sona erdiği zamanın Evrenin evriminde önemli bir rol oynadığı düşünülmektedir.
- $t \sim 10^{-34} s$ 'den elektromanyetik ve zayıf kuvvetlerin ayrıldığı $t \sim 10^{-12} s$ 'ye kadar yeni fiziksel süreçler meydana gelmemiştir.
- Bu aralık **çöl** olarak isimlendirilmektedir.

Elektrozayıf dönemin Sonu ($t \sim 10^{-12} s$, $T \sim 10^{16} K$, $E \sim 10^3 GeV$)

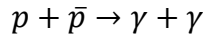
- Elektromanyetik ve zayıf kuvvetlerin ayrılmasıyla bu dönem sona ermiştir.
- Büyük birleşme döneminin sonunda farklı olarak şişmeye benzer herhangi bir etki ortaya çıkmamıştır.
- Evrenin içeriğinde tüm türlerden kuarklar, leptonlar ve bunları antiparçacıkları vardır.
- Ayrıca, fotonlar ve kuarklar arasındaki güçlü etkileşimlere aracılık eden parçacıklar da bulunmaktadır.
- Ancak sıcaklık, W^- , W^+ ve Z^0 bozonlarının üretilmesi için çok düşüktür.
- Bu nedenle, zayıf etkileşimlere aracılık eden parçacıklar yok olmuştur. Dolayısıyla, zayıf ve elektromanyetik kuvvetler ayrılmıştır.

Kuark – Hadron Geçişi ($t \sim 10^{-5} s$, $T \sim 10^{12} K$, $E \sim 1 GeV$)

- Günümüzde kuarkları tek başına görme şansımız yoktur, her zaman hadronların içinde hapsolmuş durumdadırlar.
- Erken Evrende yüksek enerjinin olduğu şartlarda, kuarklar hadronlara bağlı değil, serbest hareket eden parçacıklar olarak bulunmaktaydılar.
- Serbest kuarkların ve antikuarkların varlığı, etkileşim enerjisi 200 MeV'a düştüğünde ve Evren soğuduğunda sona ermiştir.
- Bu evrede, Evren kuarkların hadronlara bağlı hale geldiği bir evre geçişi yaşamıştır (suyun donarak buz olması gibi).
- Bu evre geçişi **kuark-hadron evre dönüşümü** adlandırılır.
- Bu süreçte birçok farklı hadron çeşidi oluşmasına rağmen Evrenin kompozisyonunda uzun süre etkili olacak kadar kararlı olan iki hadron vardır; **Proton ve nötron**.
- Proton (ve antiproton) kararlı bir parçacıktır.
- Proton (ve antiproton) diğer parçacıklarla reaksiyona girer fakat bozdukları görülmemiştir.
- Günümüzde hidrojenin bol miktarda oluşu protonun kararlılığına bir örnektir.
- Protondan farklı olarak, nötron (ve antinötron) kararsızdır.
- Tek başına bir nötron β^- bozunması reaksiyonu gösterir.

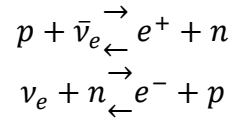


- Nötronun yarı ömrü 615 saniyedir. Dolayısıyla bozunma sürecinin etkisi ihmal edilirse saniyenin triyonda biri zaman zarfında gerçekleşen olaylarla kıyaslandığında nötron kararlıdır denebilir.
- Proton ve nötronun kütle enerjisi 938 ve 940 MeV'tur.
- Serbest kuarklar hadronları oluşturduklarında tipik etkileşim enerjisi proton-antiproton çiftleri üretmek için çok düşük kalır.
- Dolayısıyla, proton ve antiprotonlar birbirlerini yok edeceklerinden Evrenden kaybolurlar.



- Bu reaksiyon nötron ve antinötron çifti için de geçerlidir.

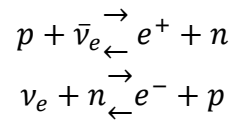
- Bu dönemden önce baryonik madde parçacık ve anti parçacık formundaydı (ya kuark ya da baryon), ancak bu dönemde parçacıkların çoğu birbirini yok etti.
- Bu dönemde de parçacık ve antiparçacık arasındaki dengesizlik önemlidir. Yoksa yine Evrende baryonik madde olmayacaktı.
- Parçacık ve antiparçacık sayısı arasındaki dengesizlik günümüz gözlemlerinden ölçülebilmektedir. Çünkü komoving hacimde bulunan ne baryon ne de foton sayısı günümüze kadar değişmemiştir.
- Günümüzde kozmik mikrodalga arkaplan fotonlarının baryon sayısına oranı baryon-antibaryon dengesizliğini göstermektedir.
- Günümüzde, Evrende her kararlı baryon (proton veya nötron) için kozmik mikrodalga arkaplanda yaklaşık 10^9 foton vardır.
- Kuarklar hadronları oluşturmakta ve bu hadronlar da ya bozunmakta ya da birbirini yok etmektedir.
- Sonuç olarak, az sayıda kararlı proton ya da nötron bulunmaktadır
- Ancak bu proton ve nötronlar durağan değildir, çeşitli etkileşimlerle değişim göstermektedirler.



- Evren 10^{-12} s yaşına geldiğinde, çok sayıda nötrino, antinötrino, elektron ve pozitron bu etkileşimler için hazır bulunmaktadır ve bu da etkileşimlerin olma oranını arttırmıştır.
- Bu etkileşimlerin ürünü, nötronların sayı yoğunluğunun protonların sayı yoğunluğuna olan oranına bağlıdır (n_n/n_p). Dolayısıyla bu oranın zamanla nasıl değiştiği önemlidir.
- n_n/n_p oranı bu iki baryonun kütle enerjilerinin farkına bağlıdır.
 - o Fotonun ve nötronun durgun kütle enerjileri 938.27 MeV ve 939.56 MeV'tur.
 - o Etkileşim enerjisi $939.56 - 938.27 = 1.29$ MeV'den fazlaysa proton ve nötronun sayı yoğunlukları eşit olmalıdır.
 - o Etkileşim enerjisi bu enerji farkına yakınsa, nötronun sayı yoğunluğu protonunkinden çok düşüktür.
 - o Örneğin: $t = 10^{-12}$ s için etkileşim enerjisi = 10 MeV ; $n_n/n_p = 0.9$
 $t = 0.1$ s için etkileşim enerjisi = 3 MeV ; $n_n/n_p = 0.65$

Nötrino Ayrışması ve Elektron – Pozitron Yok Oluşu ($t \sim 1$ s, $T \sim 1.5 \times 10^{10}$ K, $E \sim 1$ MeV)

- Evren 0.7 s yaşına geldiğinde



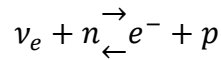
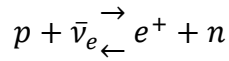
etkileşimleri meydana gelmemeye başlar.

- Evrenin yoğunluğu düştüğü için nötrinonun başka bir cisimle etkileşime girme olasılığı azalır.
- Sonuç olarak, yukardaki etkileşimler yalnızca sağdan sola doğru meydana gelir.
- Bu olay **nötrino ayrışması** olarak bilinir.
- Sonuç olarak çok sayıda nötrino (kozmetik nötrino) Evren boyunca engelle karşılaşmadan seyahat etmeye başlar.
- Nötrino ayrışmasından sonra Evren 1 s yaşındayken, Evrenin sıcaklığı ortalama etkileşim enerjisi 1 MeV olacak şekilde azalır.
- Bu enerji elektron-pozitron çiftlerinin oluşması için gereken enerjidir.

Sıcaklık düşmeye devam ettikçe, elektron – pozitron çiftleri kaybolmaya başlar. Çünkü yeni çiftler oluşmamakta ve $e^- + e^+ \rightarrow \gamma + \gamma$ etkileşimi devam etmektedir.

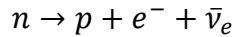
- e^- ve e^+ sayıları dramatik şekilde azalır.
- Baryonlarda olduğu bu çift arasındaki dengesizlik te gibi 10^9 elektrona karşı bir pozitron olacak şekildedir.
- Burada önemli olan olay, elektron – pozitron yok oluşu sonucu ortaya çıkan enerjinin anında fotonlar, baryonlar ve kalan elektronlar tarafından paylaşılmasıdır.
- Bunun sonucu olarak sıcaklığın çok hızlı azalmadığı kısa bir dönem olmuştur.
- Pozitronların ve birçok elektronun yok olması protonların nötronlara ya da tam tersi olan etkileşimleri kısıtlamıştır.
- Bu etkileşimlerin tamamen durduğu zaman proton ve nötron sayı yoğunluklarının oranı $n_n/n_p \sim 0.22$ 'dir. Yani, her 100 proton için 22 nötron kalmıştır.

SORU:



etkileşimleri kısıtlandığı ya da durduğu dönemde nötronun protona çevrilmesi nasıl gerçekleşmektedir?

CEVAP: Serbest nötronların β^- bozunması devam etmektedir.



Çünkü bu reaksiyonda nötrondan başka bir parçacığa ihtiyaç yoktur.

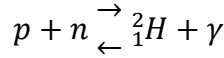
Nükleosentez ve Işık elemanlarının Bolluğu ($t < \text{birkaç yüz saniye}$, $T > \text{birkaç Kelvin}$, $E > \text{birkaç } 10^4 \text{ eV}$)

- $t \sim 1 \text{ s}$ yaşındayken sıcaklık $T \sim 10^{10} \text{ K}$ 'dir ve Evrendeki baryonik madde proton ve nötron formundadır.

- Bu zamanda fiziksel şartlar nükleer füzyon reaksiyonlarının başlaması için uygundur. Bu reaksiyonlar sonucu **nüklit** adı verilen Hidrojenden daha büyük atom kütesine sahip çekirdekler oluşur.
- Bu süreç **ilk** veya **ilkel nükleosentez** olarak adlandırılmaktadır.
- Bu süreç yıldızların içinde element oluşumunu ifade eden yıldız nükleosentez süreçlerinden farklıdır.
- Evrendeki şartların sürekli olarak değişmesi temel farktır.

Döteryumun oluşması ve Varlığını Sürdürmesi

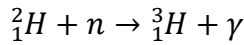
- Meydana gelen ilk füzyon reaksiyonu proton ve nötron arasında olup **döteryum çekirdeğini** oluşturmuştur. Bu bir nötron yakalama reaksiyonudur.



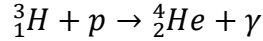
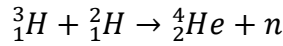
- Bu döteryum çekirdeği **döteron** olarak ta bilinir ve bu süreç tersine çevrilebilir bir reaksiyondur. Döteron, γ ışınlarıyla parçalanabilir. Bu süreç **foto ayrışma** olarak bilinir.
- Foto ayrışma için bir fotonun 2.23 MeV enerjiden fazlasına ihtiyaç vardır.
- $t = 1$ s'de bu enerjiye sahip fotonlar olmasına rağmen Evren genişleyip soğudukça ortalama foton enerjisi azalmıştır.
- Bu azalma döteryumun $t = 3$ dakikaya kadar hayatta kalabilmesini sağlamıştır.
- Döteryum sayısı sıcaklığın 10^9 K'den daha büyük olduğu değerlerde artmaya başlamıştır.
- Bu da $t = 200$ s'ye denk gelmektedir.

İlk Nükleer Reaksiyonlar

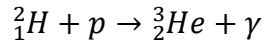
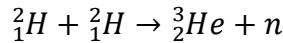
- Döteryum sayısındaki artışla birlikte diğer nükleer reaksiyonlar da başlar.
- Özellikle bir dizi reaksiyonla birlikte oldukça kararlı bir nüklit olan Helyum-4 (4_2He) ortaya çıkmıştır.
- Döteryumdan Hidrojenin izotopu olan Trityum oluşmuştur.



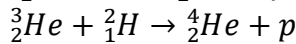
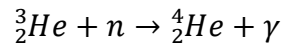
- Trityumdan Helyum-4 oluşmuştur.



- Döteryumdan He-3 oluşmuştur.



- Helyum-3'ten Helyum-4 oluşmuştur.



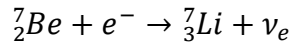
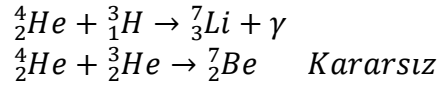
- Bunlar Helyum-4 üreten baskın reaksiyonlardır.

- Nükleosentezin büyük kütle numaralarına sahip çok sayıda nükleit üretmemesinin iki sebebi vardır.

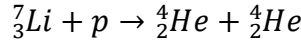
- o İki çekirdeğin birleşme oranı sıcaklığa bağlıdır. Daha yüksek atom numaralı çekirdekleri birleştirmek için daha yüksek sıcaklıklar gerekir. Döteron kolaylıkla foto ayrıştırılabildiği için nükleosentez süreci yalnızca sıcaklık göreceli olarak düşük olduğunda başlar. Sonuç olarak, H ve He'dan ziyade nükleitlerle ilgili olan füzyon reaksiyonlarının oranı düşük olmaktadır.

- o İkinci sebep ise kütle numarası 5 ya da 8 olan kararlı nükleit eksikliğidir.

- Kütle numarası 5 olan kararlı bir nükleitin eksikliği, He-4'ün en bol bulunan türler olan proton ve nötronla reaksiyona girmediği anlamına gelmektedir. Bu sorun Trityum ve He-3 içeren reaksiyonlarla çözülmektedir.



- Diğer bir reaksiyonda ise Li-7 protonla reaksiyona girer. Ancak sonuç olarak yeni oluşan Li yok olur ve 2 He-4 çekirdeği oluşur.



- Lityum kazancı düşüktür. Lityum bu dönemde oluşan H ve He'dan ağır tek elementtir.
- Bu reaksiyonlar çok kısa bir zaman aralığında gerçekleşir.
- Evren $t = 1000$ s yaşına gelince (17 dakika) ve $T \sim 5 \times 10^8 K$ iken bu reaksiyonlar durur.

Helyumun Başlangıç Bolluğu

- Helyumun bolluğunu takip etmek için başlangıç olarak nötron ve protonun sayı yoğunluklarının oranı hesaplanmalıdır.
- Bu oran $t \sim 0.7$ s'de $n_n/n_p \sim 0.22$ 'dir.
- Bu anda sıcaklık döteryumun hayatta kalabileceği maksimum sıcaklıktan daha yüksektir.
- Dolayısıyla, Helyum sentezi başlamadan önce bir gecikme olmuştur.
- Bu gecikme esnasında n_n/n_p oranı sabit kalmamıştır. Çünkü nötron kararlı bir parçacık değildir.
- Yarı ömrü 615 s olan Serbest nötronlar β^- bozunması geçirirler.
- Döteryum oluşmaya başladığı zamanda $n_n/n_p \sim 0.16$ 'dır.
- Bu değerden yola çıkarak Helyumun kütle kesri hesaplanmaktadır.

$$Y = \frac{\text{Ortamdaki Helyumun kütlesi}}{\text{Ortamdaki baryonik maddenin toplam kütlesi}}$$

- Baryonik maddenin toplam kütesine katkı H ve He 'dan gelmektedir.

$$Y = \frac{N_{\text{He}} m_{\text{He}}}{N_{\text{He}} m_{\text{He}} + N_{\text{H}} m_{\text{H}}}$$

Burada N çekirdek sayısı, m kütle.

- $m_{He} \approx 4 m_H$

$$Y = \frac{4N_{He}}{4N_{He} + N_H}$$

- Her Helyum çekirdeğinde 2 nötron varsa, Helyum çekirdeklerinin sayısı nötronların sayısının yarısı olur. Yani $N_{He} = N_n/2$
- Hidrojen çekirdeklerinin sayısı = proton sayısı – Helyum çekirdeklerinde bulunan protonların sayısı. Yani $N_H = N_p - 2N_{He} = N_p - N_n$
- Bu terimler yukarıdaki formülde yârine konursa;

$$Y = \frac{2N_n}{N_p + N_n} = 2 \left(\frac{1}{1 + \frac{N_p}{N_n}} \right)$$

- Komoving bir ortamda proton ve nötron sayılarının oranı, proton ve nötron sayı yoğunlukları oranına eşittir.

$$\frac{N_p}{N_n} = \frac{n_p}{n_n} \text{ ise}$$

$$\text{Helyumun kütle oranı } Y = 2 \left(\frac{1}{1 + \frac{n_p}{n_n}} \right)$$

SORU: Döteryumun oluşmaya başladığı anda ilkel nükleosentez sonucu oluşan Helyumun kütle oranını hesaplayınız.

CEVAP: Döteryum oluşmaya başladığı zamanda $n_n/n_p \sim 0.16$ 'dır.

$$Y = 2 \left(\frac{1}{1 + \frac{n_p}{n_n}} \right)$$

$$Y = 2 \left(\frac{1}{1 + \frac{1}{0.16}} \right) = 0.276 \approx 0.28$$