



UCIRVINE



SMU



# Parçacık Fiziği

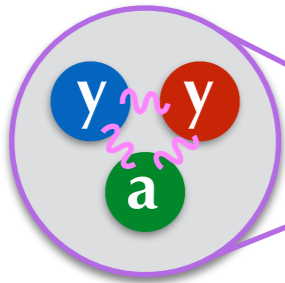
**Alaettin Serhan Mete<sup>1</sup> ve Tülin Varol<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>University of California, Irvine ve <sup>2</sup>Southern Methodist University

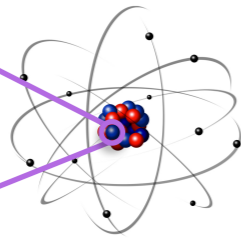
# Parçacık Fiziği

- Parçacık fiziği maddenin yapıtaşlarını inceleyen fizik dalıdır
  - Aynı zamanda *yüksek enerji fiziği* olarak da adlandırılır çünkü bu yapıtaşları sadece yüksek enerjili çarpışmalarda ortaya çıkarlar, parçacık hızlandırıcılarında olduğu gibi...

$10^{-15}$   $10^{-12}$   $10^{-9}$   $10^{-6}$   $10^{-3}$  1  $10^3$   $10^6$   $10^9$   $10^{12}$   $10^{15}$   $10^{18}$   $10^{21}$   $10^{24}$  m



**Proton**



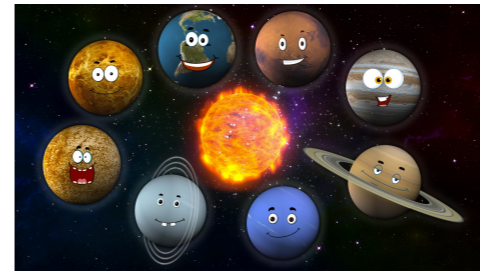
**Atom**



**Bakteri Hücresi**



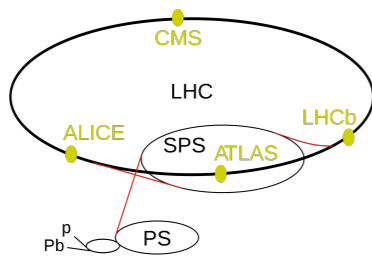
**Ev**



**Gezegenerler**



**Galaksiler**



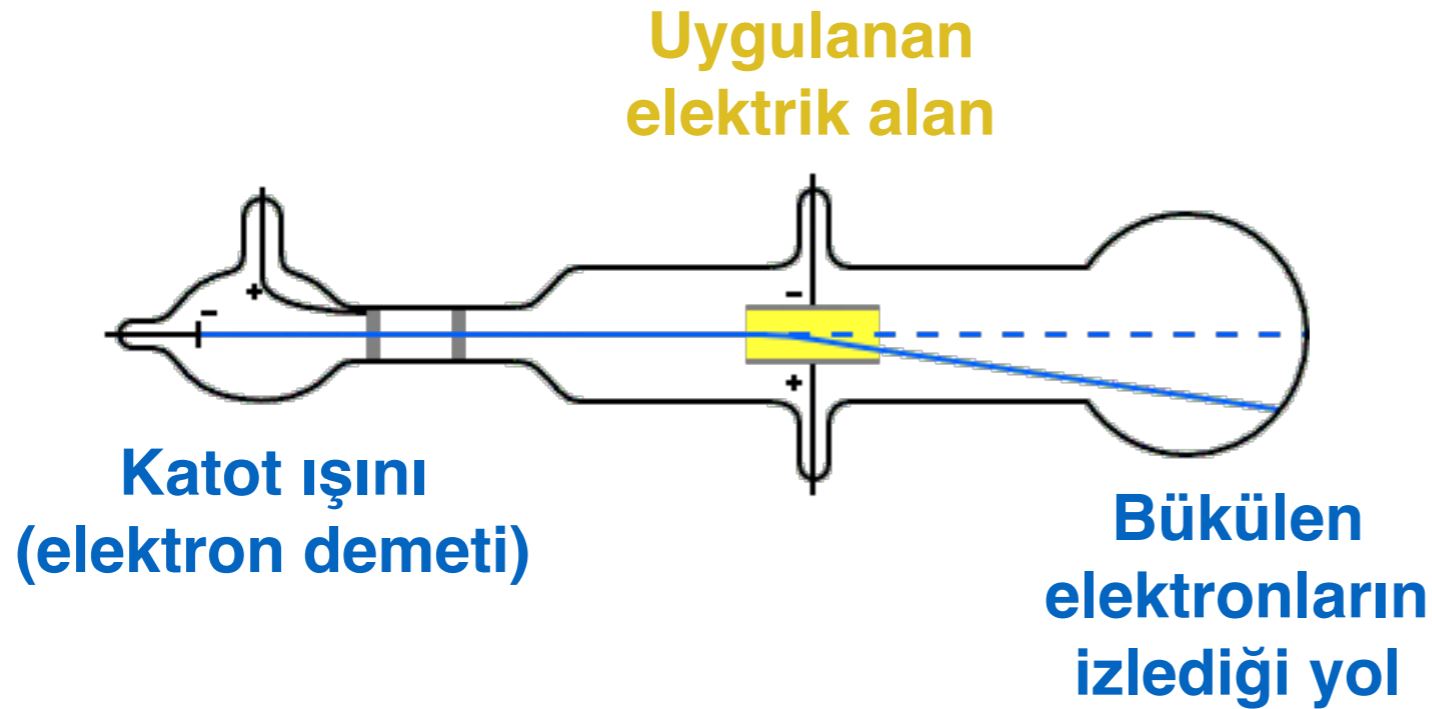
**Parçacık Fiziği**



**Kozmoloji**

# Elektronun Keşfi (1897)

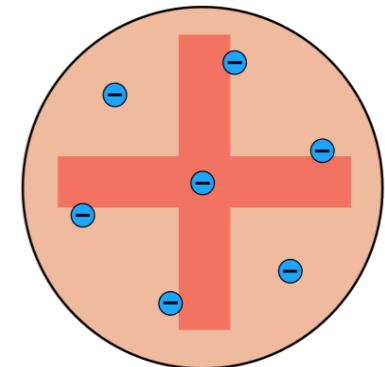
- Maddenin yapıtaşlarıyla ilgili düşünsel deneyler antik Yunan'a kadar uzanır
- Fakat modern anlamda yapılan ilk bilimsel parçacık gözlemi elektronun keşfidir



**Joseph J. Thomson**  
1856-1940

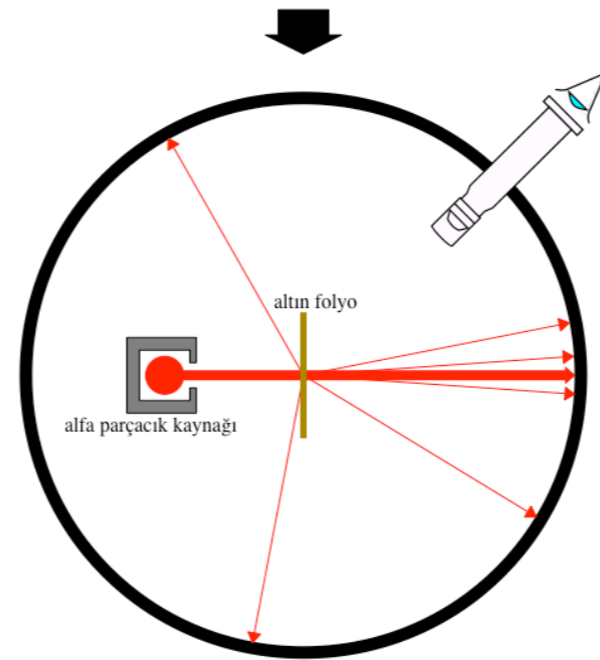
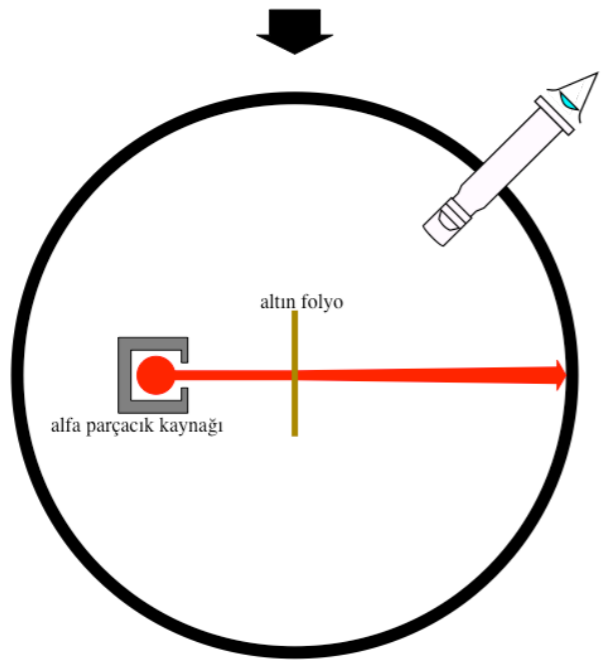
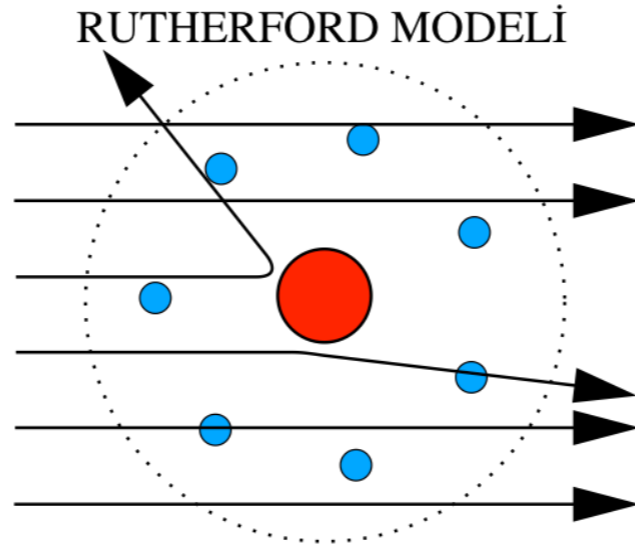
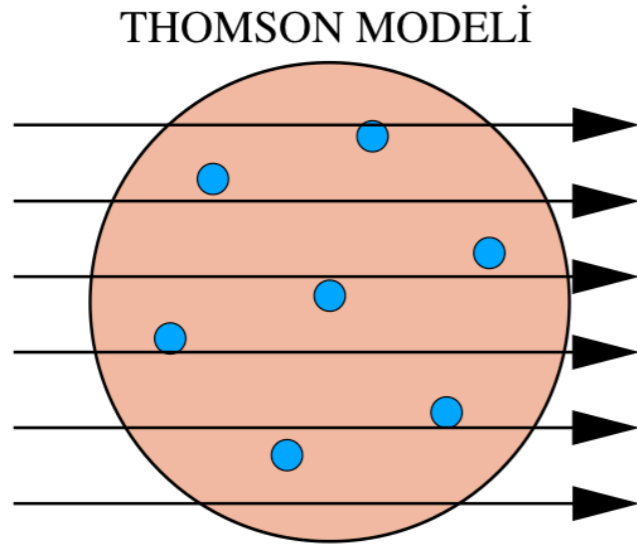
Gözlem ışının eksi yüklü parçacıklardan oluştuğuydu  
Bu parçacıklar şimdi *elektron* olarak bilinmekte

Thomson 1904 yılında atomun artı yüklü bir küre içinde gelişigüzel dağılan eksi yüklü parçacıklardan oluşan parçalanabilir bir yapı olduğunu öne sürdü:  
“Üzümlü kek” modeli

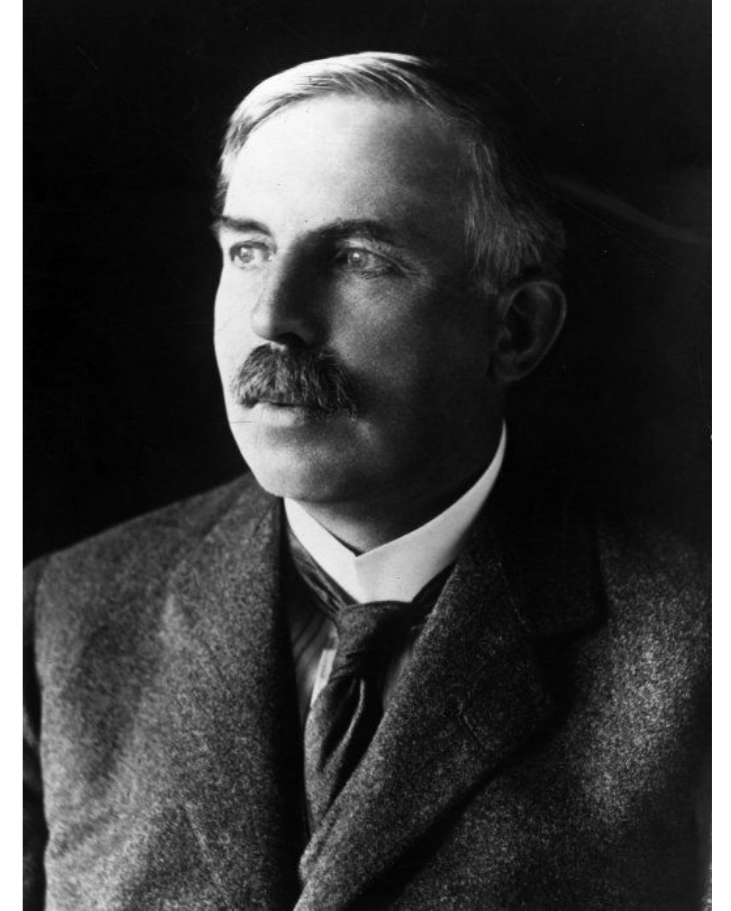


# Atom Çekirdeği

Geiger-Marsden Denei



GÖZLEMLENEN SONUÇ



**Ernest Rutherford**  
**1871-1937**

1908-1913 arasında Rutherford'un gözetimide Hans Geiger ve Ernest Marsden tarafından yapılan deneylerde Thomson modelinin pek de doğru olmadığı gözlemlendi

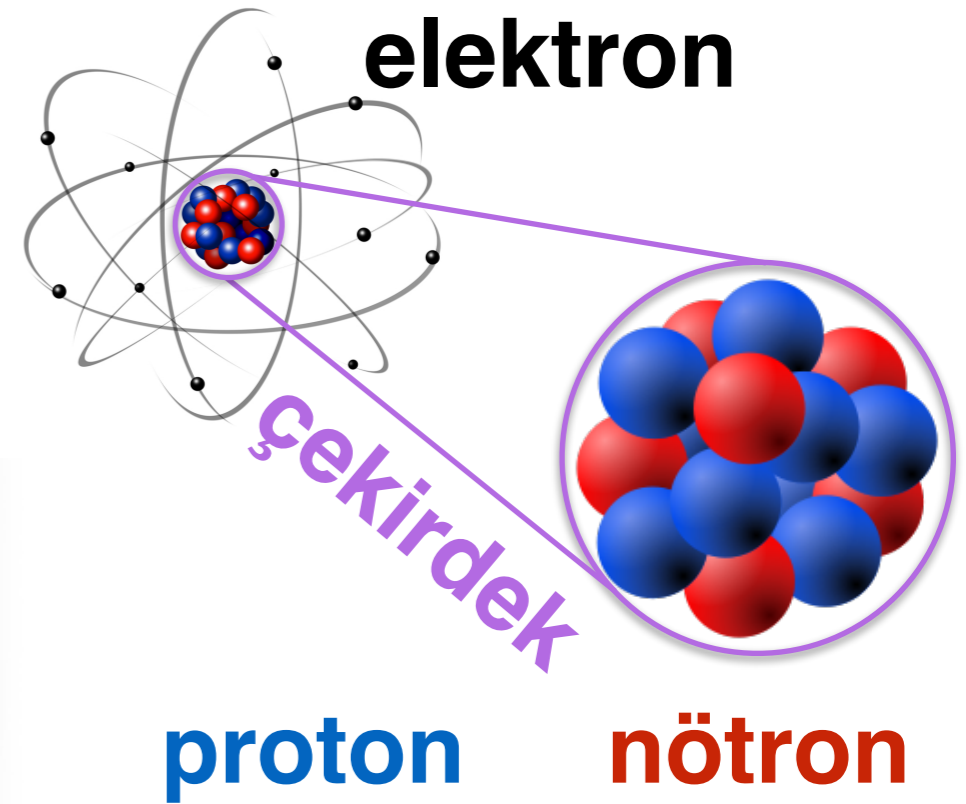
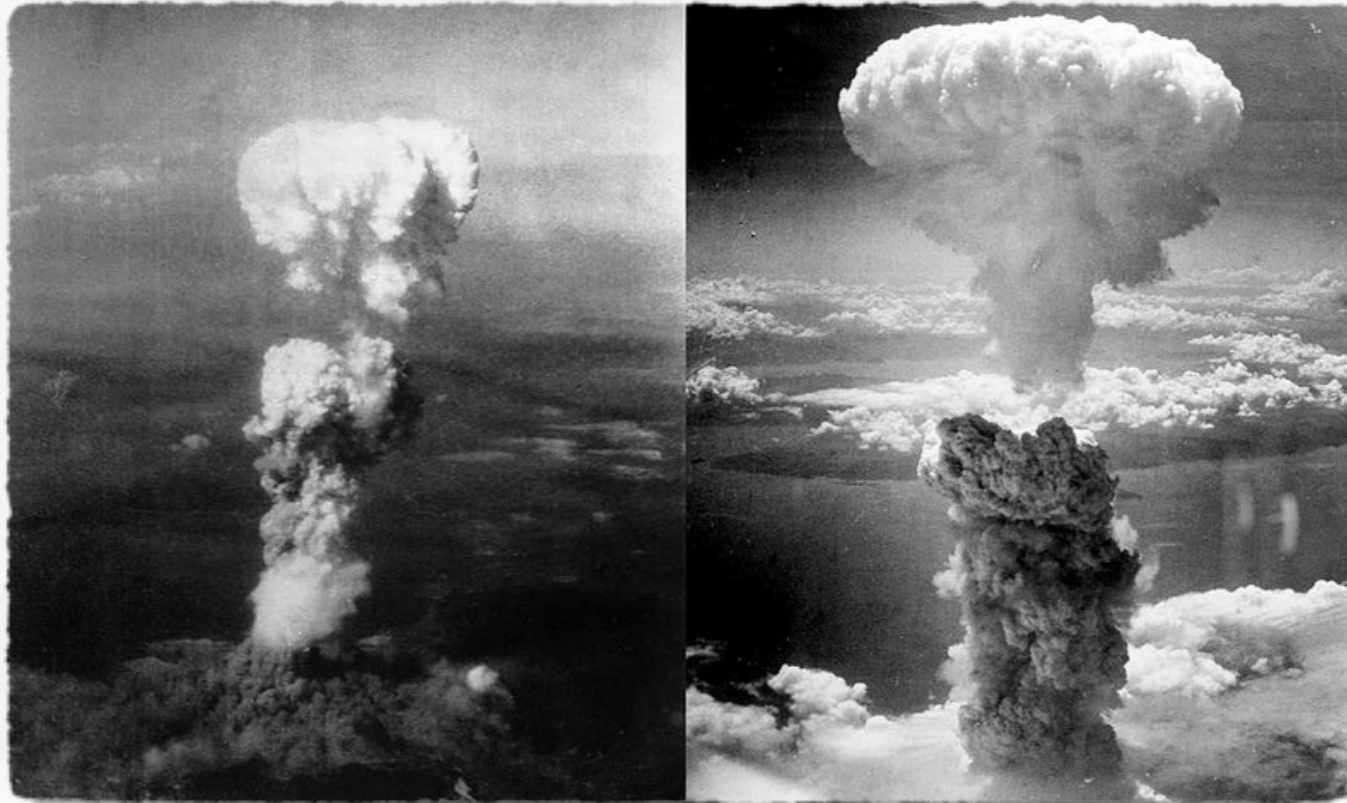
Rutherford deney sonuçlarına dayanarak atomun artı yüklü bir çekirdek ve onun etrafında dönen elektronlardan oluştuğunu öne sürdü (1911/1913): Rutherford modeli

# Atom Çekirdeğinin Yapısı

**Proton** : Daha öncede gözlemlenmiş olmasına rağmen atom modeliyle bağlantısı ve isim babası Rutherford'dur (~1920). Aynı dönemde Rutherford nötronların varlığını da öne sürmüştü ancak deneysel olarak gözlemleyememiştir...

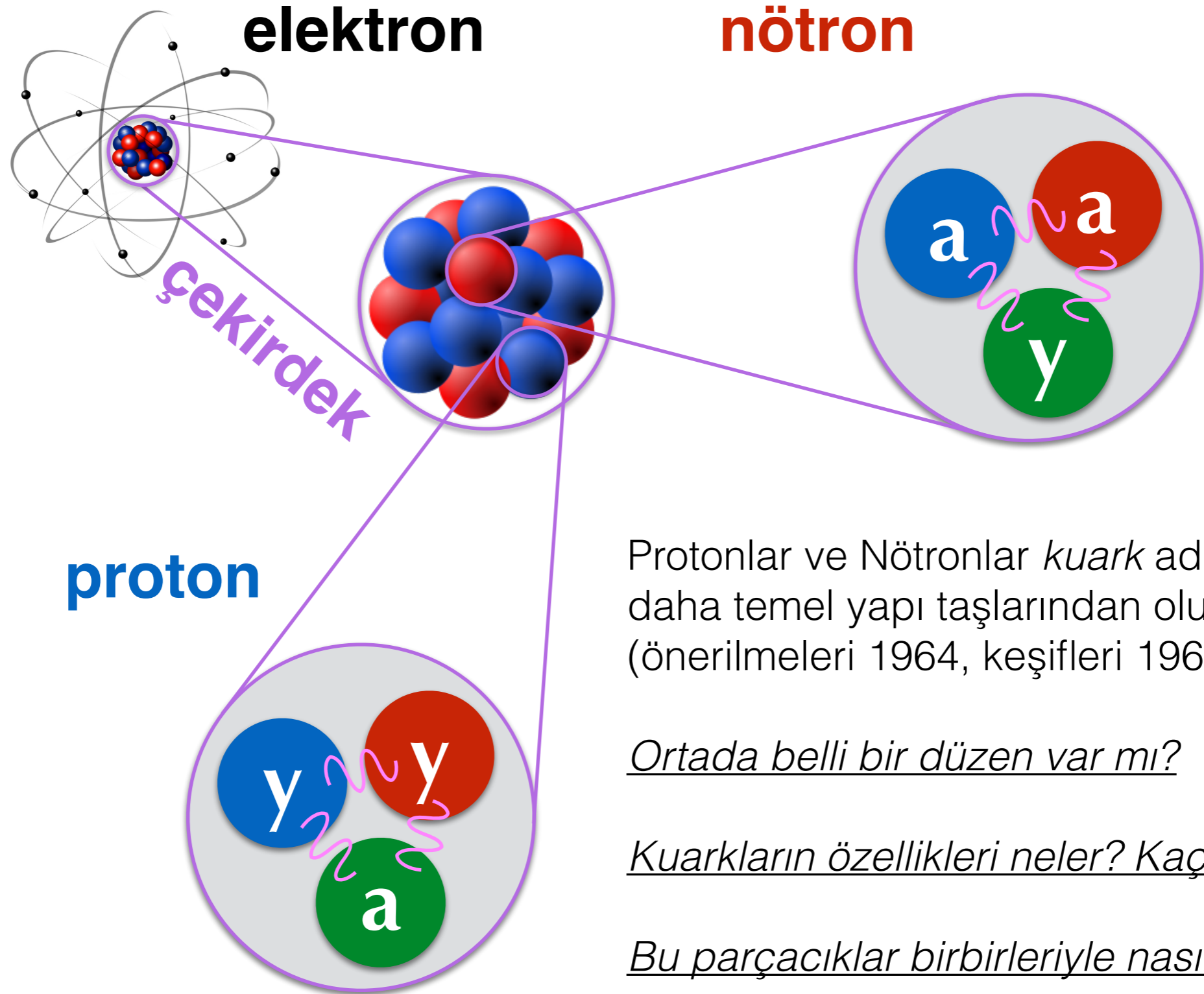
**Nötron** : James Chadwick tarafından 1932 yılında gözlemlenmiştir

*1938 yılında Otto Hahn ve Fritz Strassmann uranyum çekirdeğini parçalamayı başardılar. Deneyin sonuçları Lise Meitner ve Otto Robert Frisch tarafından açıklandı ve Frisch bunu 1939 yılında deneysel olarak ispat etti*



*peki ya onların yapıları?*

# Protonun ve Nötronun Yapısı



Protonlar ve Nötronlar *kuark* adındaki daha temel yapı taşlarından oluşmaktadırlar\* (önerilmeleri 1964, keşifleri 1968)

Ortada belli bir düzen var mı?

Kuarkların özellikleri neler? Kaç çeşit kuark var?

Bu parçacıklar birbirleriyle nasıl etkileşiyorlar?

# Temel Etkileşimler

## Güçlü Etkileşim



Atom çekirdeğini ve onu oluşturan proton ve nötronları bir arada tutan etkileşimdir.

## Zayıf Etkileşimi



Radyoaktif bozunumlardan sorumludur. Güneşin yakıtı olan nükleer tepkimelerden sorumlu olan etkileşimdir.

## Elektromanyetik Etkileşim



Atom içindeki elektronları çekirdeğe bağlayan, molekülleri oluşturan etkileşimdir.

## Kütle Çekim Etkileşimi



Kütlesi olan maddeler arasındaki etkileşimdir. Gezegenleri, yıldızları, galaksileri bir arada tutar.

# Dönü (Spin)

- Temel parçacıkların yapısal özelliklerinden biri **dönü**dür
- Bu özellik süreğen değil sadece kesintili değerler alabilir ve parçacıklar bu değerlerine göre gruplandırılırlar:
  - Fermiyonlar \_\_\_\_\_ :  $1/2, 3/2, 5/2 \dots$
  - Bozonlar \_\_\_\_\_ :  $0, 1, 2, \dots$
- **Fermiyonlar:**
  - *Fermi-Dirac* istatistiğine uyarlar (Pauli dışlama prensibi)
  - Maddenin yapıtaşları bu kategoride yer alırlar (elektronlar, kuarklar...)
- **Bozonlar:**
  - *Bose-Einstein istatistiğine uyarlar* (arkadaş canlısıdırlar, birbirlerini dışlamazlar)
  - Temel etkileşimlerin taşıyıcıları (?) bu kategoride yer alırlar
- Bu parçacıklar kendi içlerinde de farklı özellikleri nedeniyle farklı gruplara ayrılırlar

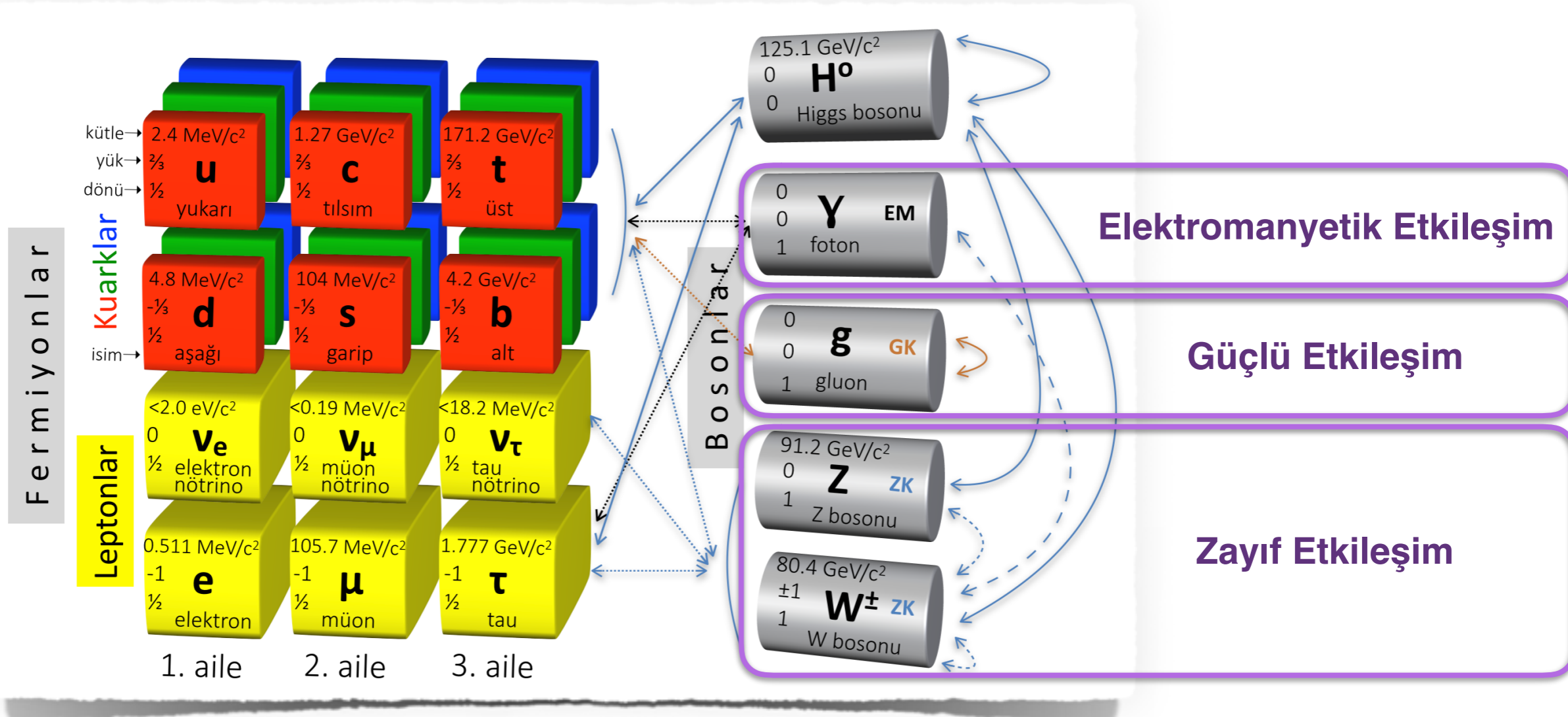


# Bilinen Temel Parçacıklar ve Etkileşimleri

Kuarklar 3 renk yükü taşırlar (mavi, yeşil, kırmızı)

1. aile kuarklar protonlar ve nötronları yani atom çekirdeğini oluştururlar  
Onlara elektronların da katılmasıyla atomlar (yani madde) oluşur

2. ve 3. aile parçacıklar erken evrende varolmuşlardır ve günümüzde doğada kendiliklerinden bulunmazlar



# Kim, Kimle, Nerede, Nasıl?

Özellik / Etkileşim	Kütle Çekimi	Elektromanyetik	Zayıf	Güçlü
		Eletro-zayıf		
Etkileşim nedeni	Kütle-Enerji	Elektrik yükü	Çeşni	Renk yükü
Etkileşenler	Hepsi	Elektrik yükü olan tüm parçacıklar	Kuarklar, Leptonlar	Kuarklar, Gluonlar
Taşıyıcılar	Graviton (?)	Foton	$W^\pm$ ve Z bozonları	Gluon
Kuark düzeyindeki kuvveti	$10^{-41}$	1	$10^{-4}$	$10^1$

- **Karşit parçacıklar:**

- Her parçacığın *kuantum mekaniksel* özellikleri zıt olan bir ikizi vardır
- Elektrik yükü ters olan elektron - pozitron, lepton sayısı ters olan  $\nu_e$  -  $\bar{\nu}_e$  gibi

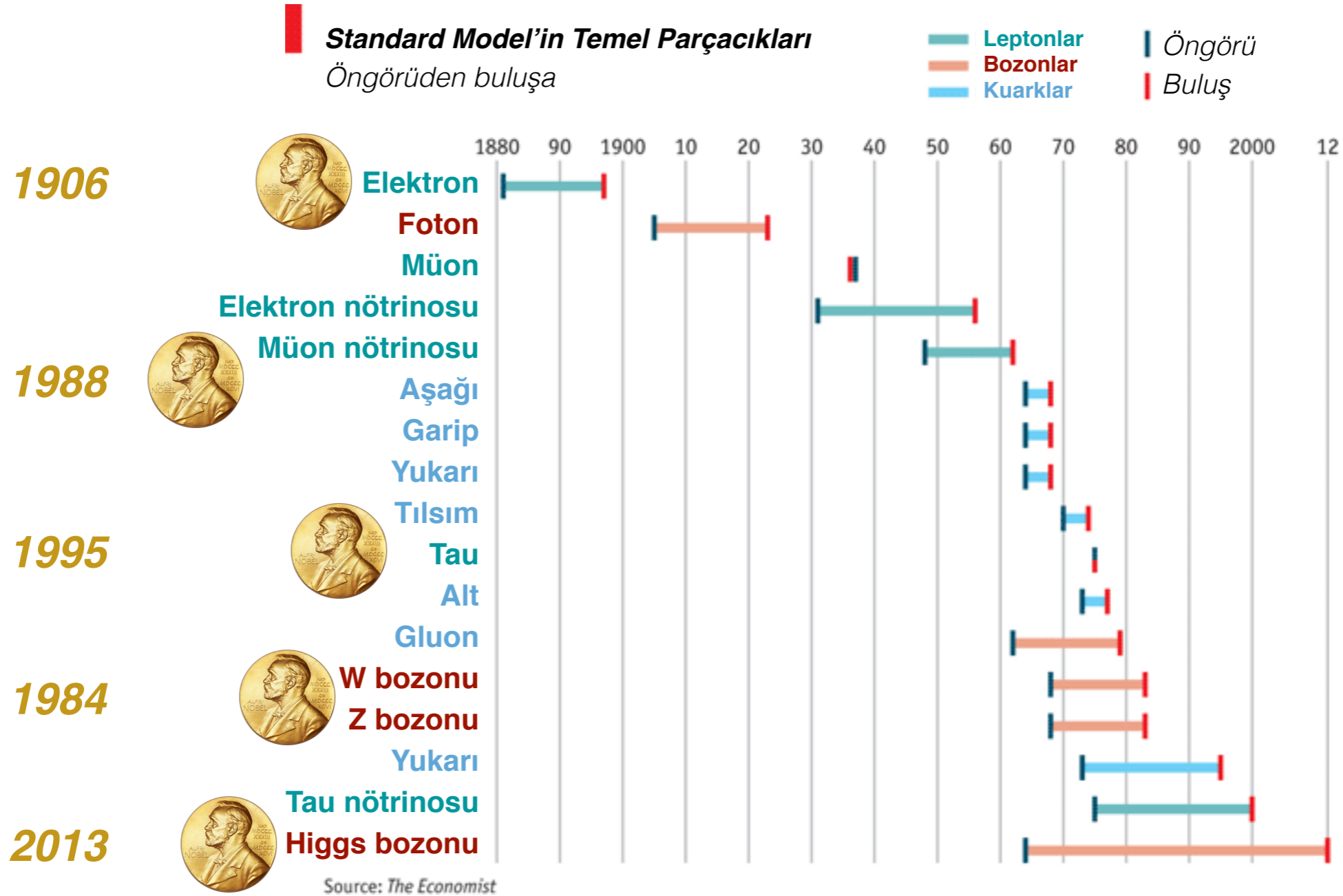
- Karşit parçacıklarla beraber toplamda **61** temel parçacık vardır

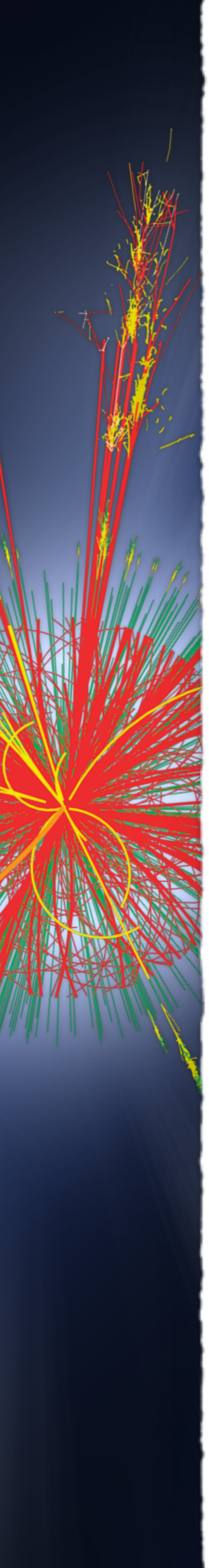
- Bunlara ek olarak bu temel parçacıklardan oluşan bileşik parçacıklar vardır

- 2 kuark bir araya gelerek **mezonları** oluştururlar, örn. pion
- 3 kuark bir araya gelerek **baryonlar** oluştururlar, örn. proton ve nötron

**hadronlar**

# Temel Parçacıkların Keşifleri





# Temel Etkileşimlerin Arkasındaki Teoriler

# Kuantum Alan Teorisi



**Kuantum Alan Teorisi** atom altı parçacıkların birbirleriyle olan etkileşmelerini anlatan kuramsal bir sistemdir

Bu teoriye göre parçacıkların birbirleriyle olan etkileşmeleri onların temelini oluşturan alanların birbirleriyle olan etkileşmeleri üzerinden açıklanır

Bu etkileşmeler **Feynman Çizimleri** olarak adlandırılan şekillerle gösterilir ve bu çizimlerin kendi kuralları vardır (Feynman kuralları)

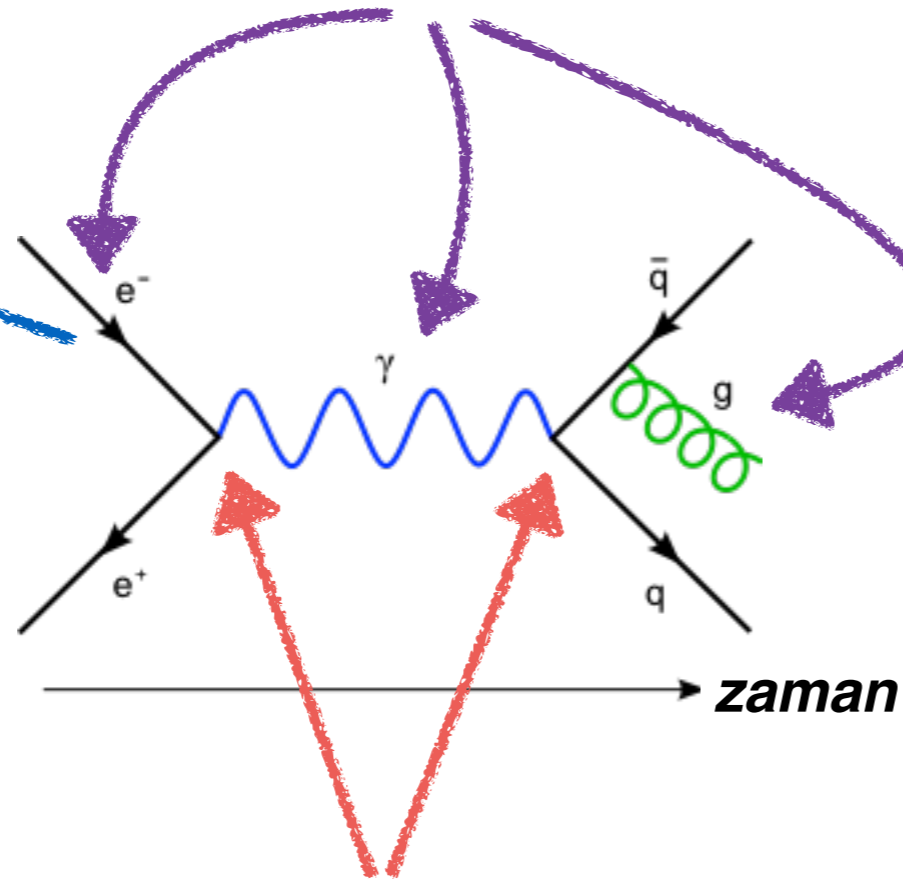
# Alanlar ve Parçacıklar

- **Klasik anlamda alan:  $T(x,y,z,t)$** 
  - Uzay-zamanda her noktaya bir değer vermek
  - Sıcaklık haritası → Sayıl alan
  - Rüzgar haritası → Yönel alan
- **Kuantum alanı:  $\psi(x,y,z,t)$** 
  - Klasik alanı KM özellikleri ekleyelim
    - Ölçüm sırası önemli olsun (değişme bağlantısı)
    - Enerji, açısal momentum sürekli değil kesikli olsun (*kuantum*) ve bir zemin enerji değeri olsun
  - Kuantum alanların karesi olasılık yoğunluk işlevi:  $\psi^*\psi$
  - Kuantum alanların ortalama değerleri klasik sonuçları versin
- **Parçacıklar ne?**
  - Kesikli alanların enerji verilip uyarılmış halleri  $|\psi\rangle$ 
    - alan<sup>2</sup> : çocuğun mutluluk ihtimali, enerji : hediye, parçacık : mutlu çocuk
  - Elektromanyetik alanın kuantumu → foton, Elektron alanın kuantumu → elektron

# Feynman Çizimleri

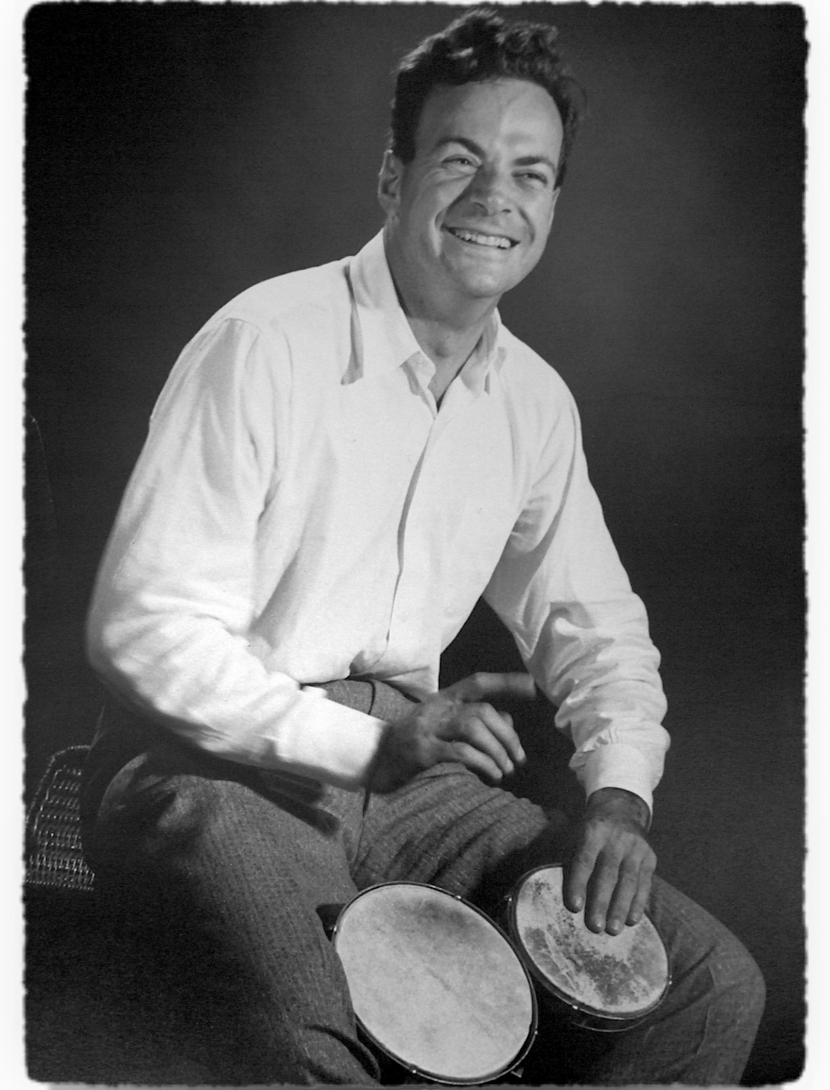
*Okların yönleri parçacıkları ve karşıt-parçacıkları ayırır*

*Her parçacık türünün özel çizim şekli vardır*



***Etkileşim noktası***

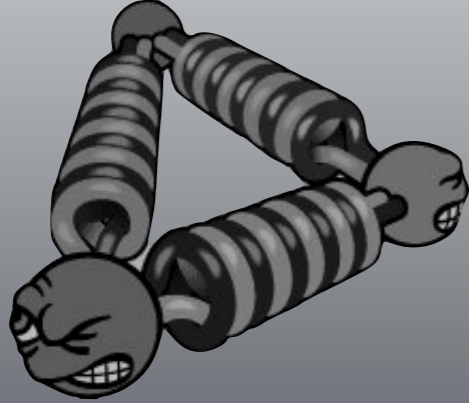
*Bu noktalarda fiziksel korunum kanunları geçerlidir  
(Elektrik yükünü, Enerji-Momentumun korunumu)*



**Richard Feynman**  
**1918-1988**

# Temel Etkileşimler

## Güçlü Etkileşim



Atom çekirdeğini ve onu oluşturan proton ve nötronları bir arada tutan etkileşimdir.

## Zayıf Etkileşimi



Radyoaktif bozunumlardan sorumludur. Güneşin yakıtı olan nükleer tepkimelerden sorumlu olan etkileşimdir.

## Elektromanyetik Etkileşim



Atom içindeki elektronları çekirdeğe bağlayan, molekülleri oluşturan etkileşimdir.

## Kütle Çekim Etkileşimi



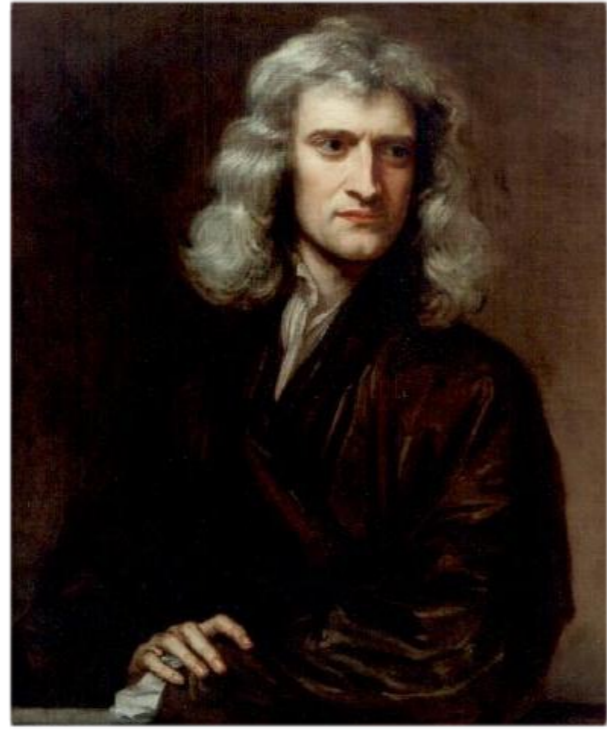
Kütlesi olan maddeler arasındaki etkileşimdir. Gezegenleri, yıldızları, galaksileri bir arada tutar.



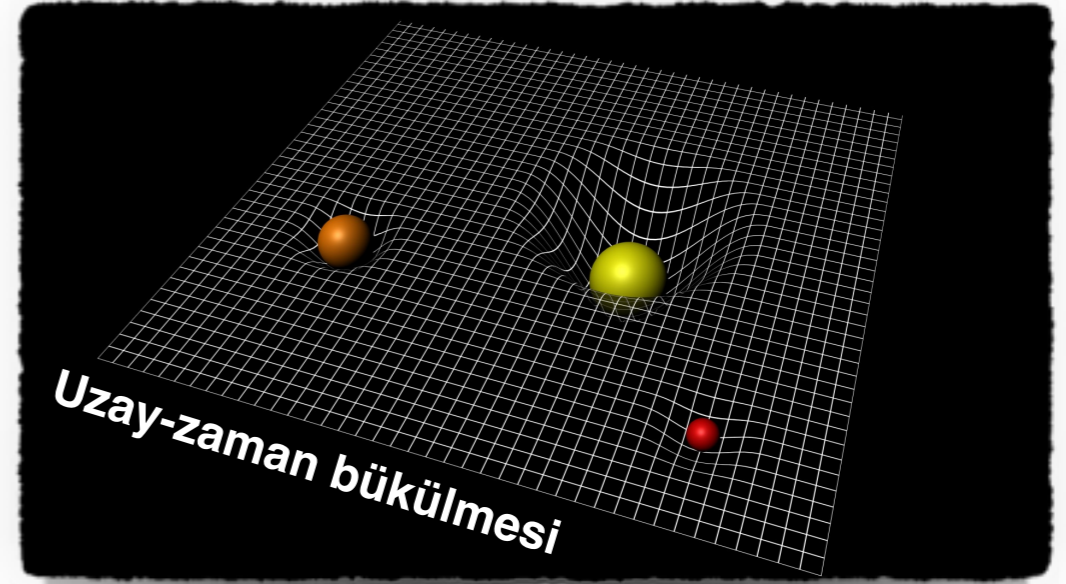
# Kütle Çekim Etkileşimi

Newton'un Kütle Çekim Teorisi

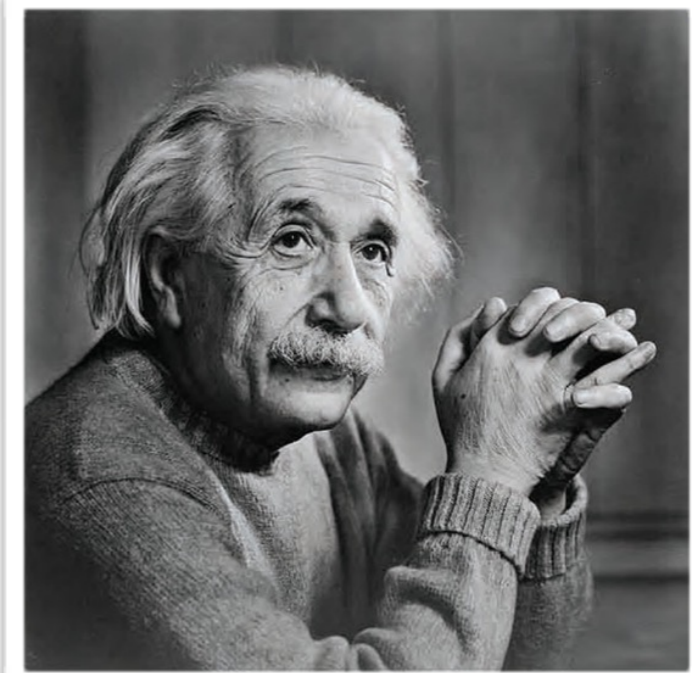
Genel Görelilik Teorisi



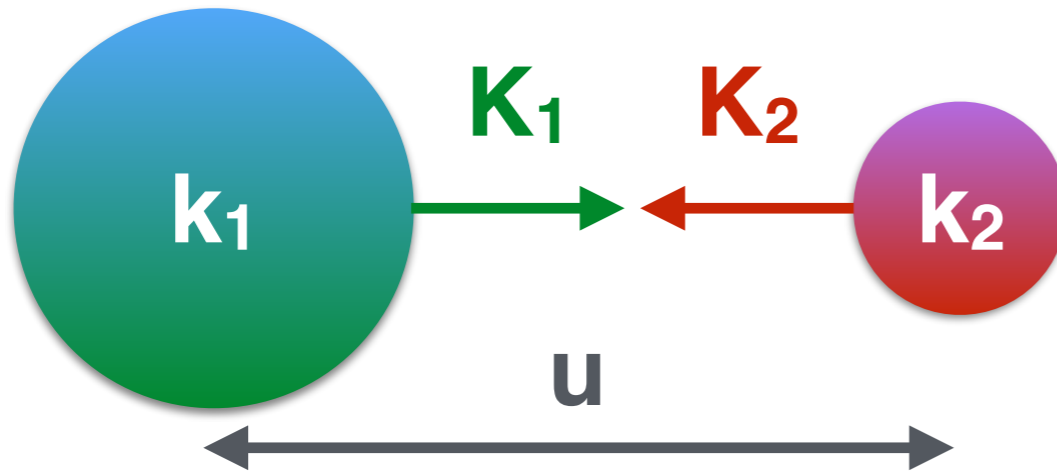
Isaac Newton  
1642-1727



$$E = mc^2$$



Albert Einstein  
1879-1955



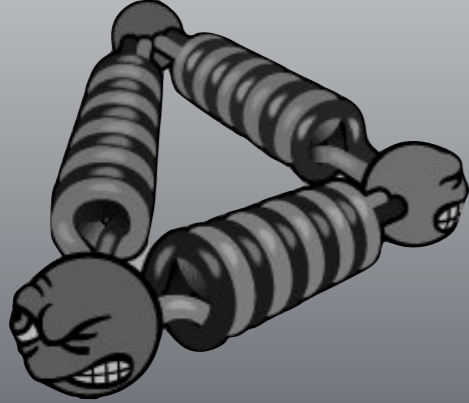
$$K_1 = K_2 = G \times k_1 \times k_2 \div u^2$$

# Graviton?

- Kütle çekim etkileşimini taşıyan kuramsal parçacık
  - Deneysel olarak henüz gözlemlenemedi
- Maddeyle etkileşim olasılığı çok düşük
  - Bu nedenle gözlemlenmesi çok zor
- Öngörülen özellikleri:
  - Kütlesiz (Kütle çekim etkisi sonsuz mesafeli)
  - Dönüsü 2 (Tensor bozon)
  - Elektrik yükü yok, yaşam ömrü sonsuz (kararlı)
- *Kütle çekim dalgalarının bulunuşu : LIGO (2016)*

# Temel Etkileşimler

## Güçlü Etkileşim



Atom çekirdeğini ve onu oluşturan proton ve nötronları bir arada tutan etkileşimdir.

## Zayıf Etkileşimi



Radyoaktif bozunumlardan sorumludur. Güneşin yakıtı olan nükleer tepkimelerden sorumlu olan etkileşimdir.

## Elektromanyetik Etkileşim



Atom içindeki elektronları çekirdeğe bağlayan, molekülleri oluşturan etkileşimdir.

## Kütle Çekim Etkileşimi



Kütlesi olan maddeler arasındaki etkileşimdir. Gezegenleri, yıldızları, galaksileri bir arada tutar.

# Elektromanyetik Etkileşim

*Ayrılmaz ikili: Elektrik ve Manyetizma*



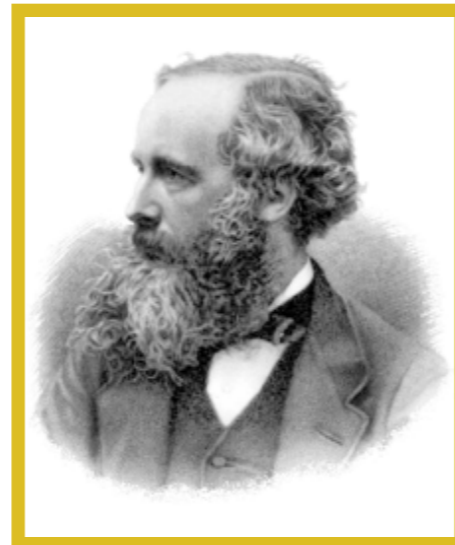
**Carl Friedrich Gauss**  
1777-1885



**Michael Faraday**  
1791-1867



**André-Marie Ampère**  
1775-1836



**James Clerk Maxwell**  
1831-1879

$$\nabla \cdot E = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

$$\nabla \cdot B = 0$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t}$$

$$\nabla \times B = \mu_0 \left( J + \epsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t} \right)$$

$E$  Elektrik alan

$B$  Manyetik alan

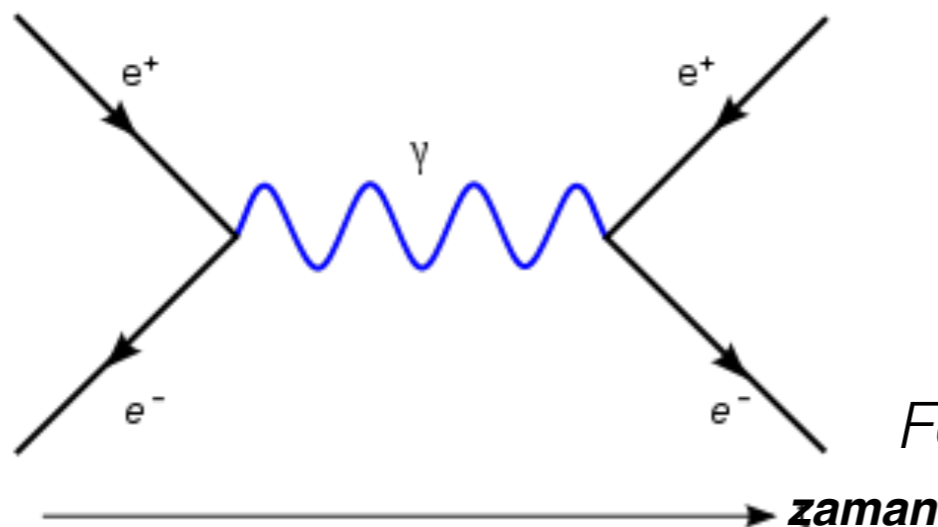
$J (\rho)$  Akım (yük) yoğunluğu

$\mu_0(\epsilon_0)$  Manyetik (Elek.) geçirgenlik

# Kuantum Elektrodinamiği ve Foton

- Elektrik yükü taşıyan bütün parçacıkların foton aracılığıyla nasıl etkileştiğini açıklar
- Kuantum mekaniği ile özel göreliliği birleştirmiştir
- Bir çok deney sonucunu yüksek duyarlılıkta (milyarda 10 hata ile) hesap etme olanağını verir

**It doesn't matter how beautiful your theory is, it doesn't matter how smart you are. If your theory doesn't agree with experiment, it's wrong. (R. Feynman)**



*Max Planck : Siyah Cisim Işıması (1900)*

$$E = n \times (hc / \lambda) \quad n = 1, 2, 3...$$

*Albert Einstein : Fotoelektrik Tesir (1905)*

*Foton kütsesiz olduğu için KED'in etkisi sonsuzdur*

# Temel Etkileşimler

## Güçlü Etkileşim



Atom çekirdeğini ve onu oluşturan proton ve nötronları bir arada tutan etkileşimdir.

## Zayıf Etkileşimi



Radyoaktif bozunumlardan sorumludur. Güneşin yakıtı olan nükleer tepkimelerden sorumlu olan etkileşimdir.

## Elektromanyetik Etkileşim



Atom içindeki elektronları çekirdeğe bağlayan, molekülleri oluşturan etkileşimdir.

## Kütle Çekim Etkileşimi



Kütlesi olan maddeler arasındaki etkileşimdir. Gezegenleri, yıldızları, galaksileri bir arada tutar.

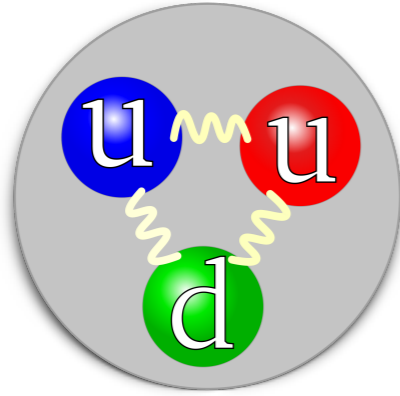
# Güçlü Etkileşim

## KUANTUM RENK DİNAMİĞİ

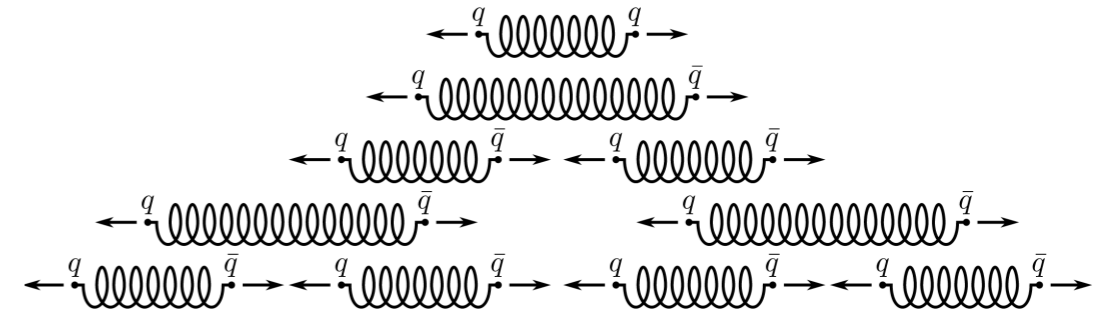
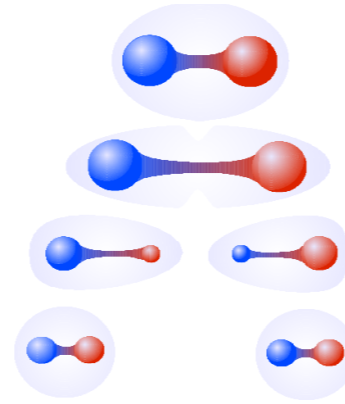
- Hadronların kendi içlerinde ve birbirleriyle olan etkileşimini açıklar
- Kuarklar 3 çeşit renk yükü taşırlar
  - Mavi, yeşil, kırmızı
- Renk yükü taşıyan parçacıklar arasındaki bu etkileşim **gluon**lar tarafından yayılır
- Renkli parçacıklar tek başına bulunamazlar
- Etkileşim kısa menzillidir ( $10^{-15}$  m): Çekirdeğin içi

# Kuantum Renk Dinamiği

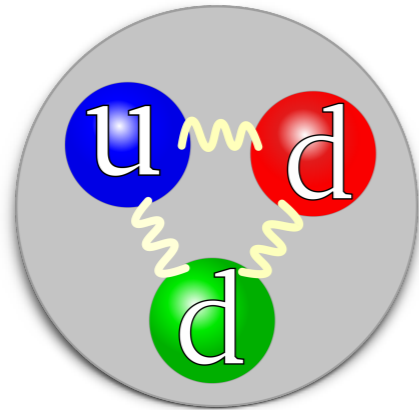
## Renk Hapsi



proton

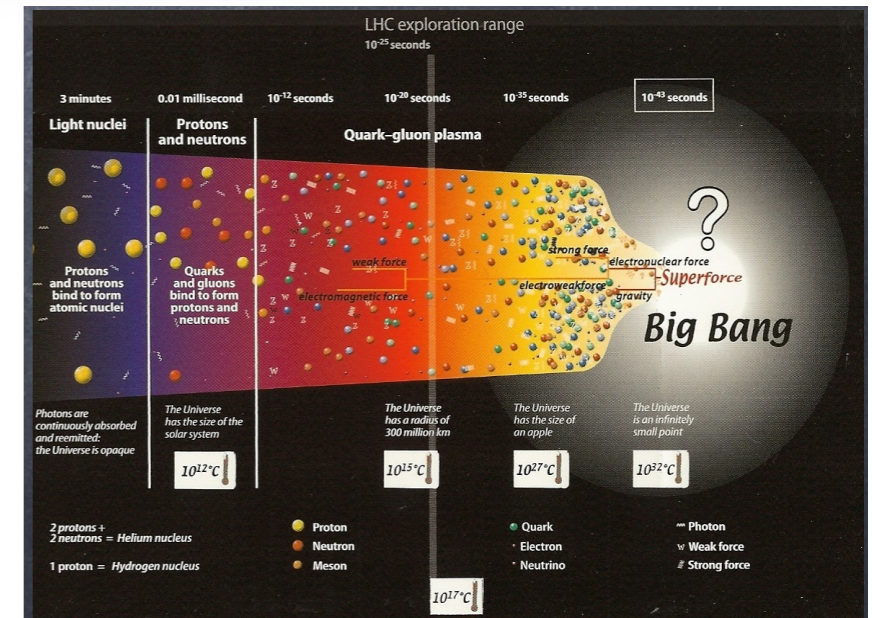


## Kavuşulmaz Özgürlük Asymptotic Freedom



nötron

Yüksek enerjiyle çekirdeğin içine bakılıp kuarklara yaklaştıkça bunlar bağlı değil, serbest gibi davranır



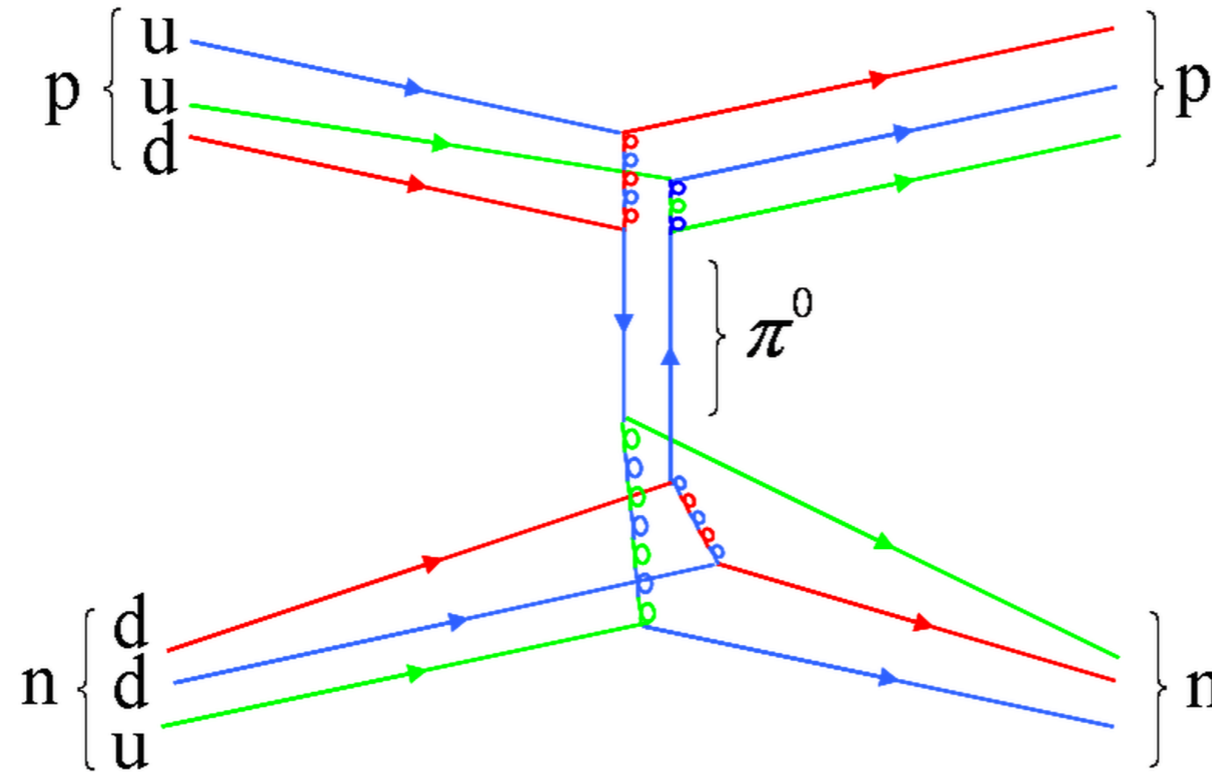
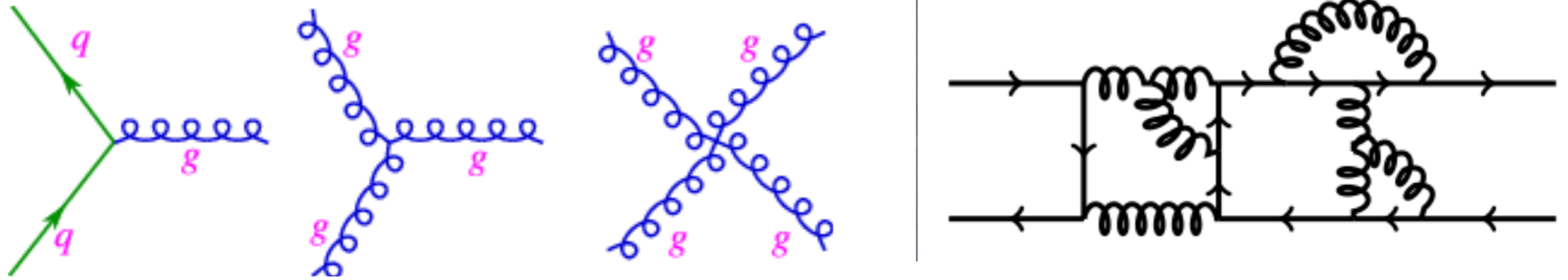


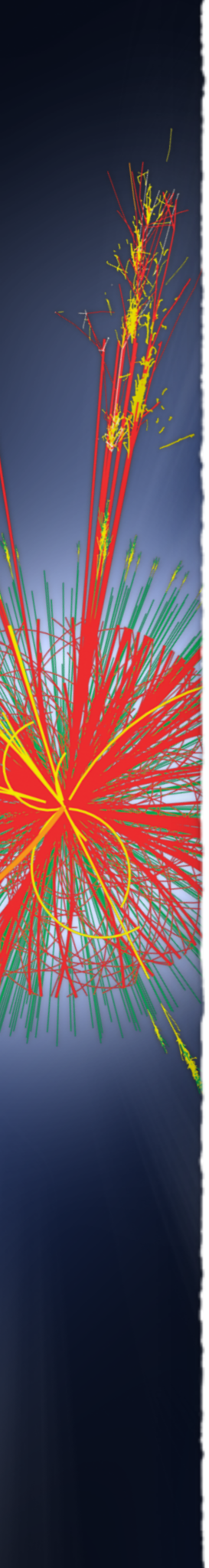
# Hadronizasyon

- Kuark ve gluonlardan hadronların oluşması işlemidir
- Büyük patlamadan hemen sonra kuark-gluon plazması soğuduğunda gerçekleşmiştir
- Parçacık çarpıştırıcılarında yüksek enerji çarpışmalarından sonra görülür
- Renkli parçacıklar “renksiz” veya “beyaz” parçacıkları oluştururlar, tek başlarına bulunmazlar
  - **Renksiz:** Bir rengin toplam katkısının sıfır olması
    - örn. Kırmızı + Zıt-Kırmızı (Mezon)
  - **Beyaz:** Her rengin katkısının eşit miktarda olması
    - örn. Kırmızı + Mavi + Yeşil (Baryon)

# Kuantum Renk Dinamiği

## Örnekler





## Kuantum Elektrodinamiği (KED)

Elektrik Yüğü → Atomlar → Moleküller

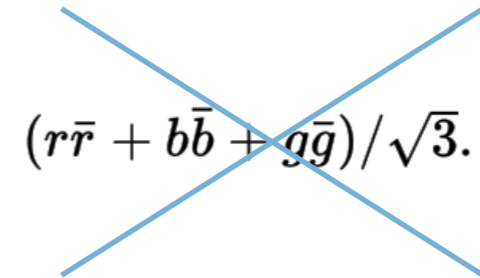
## Kuantum Renk Dinamiği (KRD)

Renk Yüğü → Baryonlar → Atom çekirdeği

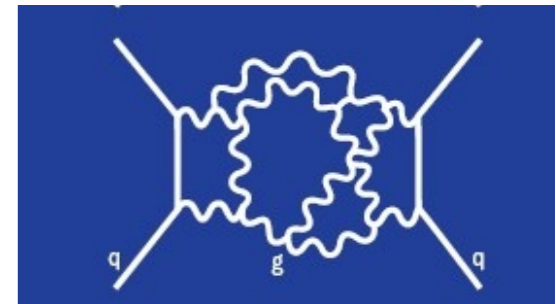
# Gluon

- 1962 yılında Gell-Mann tarafından kurgulanmıştır
- 1978 yılında Alman elektron eşzamanlayıcısında (DESY) keşfedilmiştir
- KRD'nin taşıyıcısı gluon kütlelessiz bir parçacıktır
- Renk yükü taşır, 8 çeşidi vardır

$$\begin{array}{ll} (r\bar{b} + b\bar{r})/\sqrt{2} & -i(r\bar{b} - b\bar{r})/\sqrt{2} \\ (r\bar{g} + g\bar{r})/\sqrt{2} & -i(r\bar{g} - g\bar{r})/\sqrt{2} \\ (b\bar{g} + g\bar{b})/\sqrt{2} & -i(b\bar{g} - g\bar{b})/\sqrt{2} \\ (r\bar{r} - b\bar{b})/\sqrt{2} & (r\bar{r} + b\bar{b} - 2g\bar{g})/\sqrt{6}. \end{array}$$

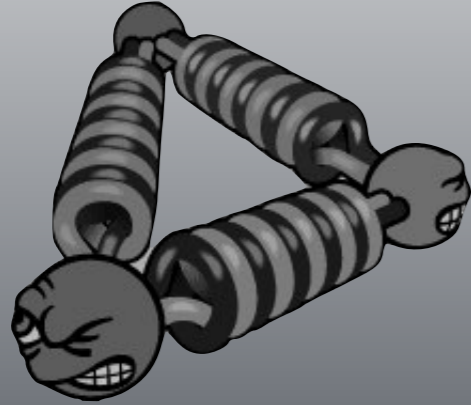

$$\cancel{(r\bar{r} + b\bar{b} + g\bar{g})/\sqrt{3}.}$$

- Kendileri ile de etkileşir
- Sadece gluonlardan oluşan bir parçacık var olabilir ama henüz bulunmamıştır



# Temel Etkileşimler

## Güçlü Etkileşim



Atom çekirdeğini ve onu oluşturan proton ve nötronları bir arada tutan etkileşimdir.

## Zayıf Etkileşimi



Radyoaktif bozunumlardan sorumludur. Güneşin yakıtı olan nükleer tepkimelerden sorumlu olan etkileşimdir.

## Elektromanyetik Etkileşim



Atom içindeki elektronları çekirdeğe bağlayan, molekülleri oluşturan etkileşimdir.

## Kütle Çekim Etkileşimi

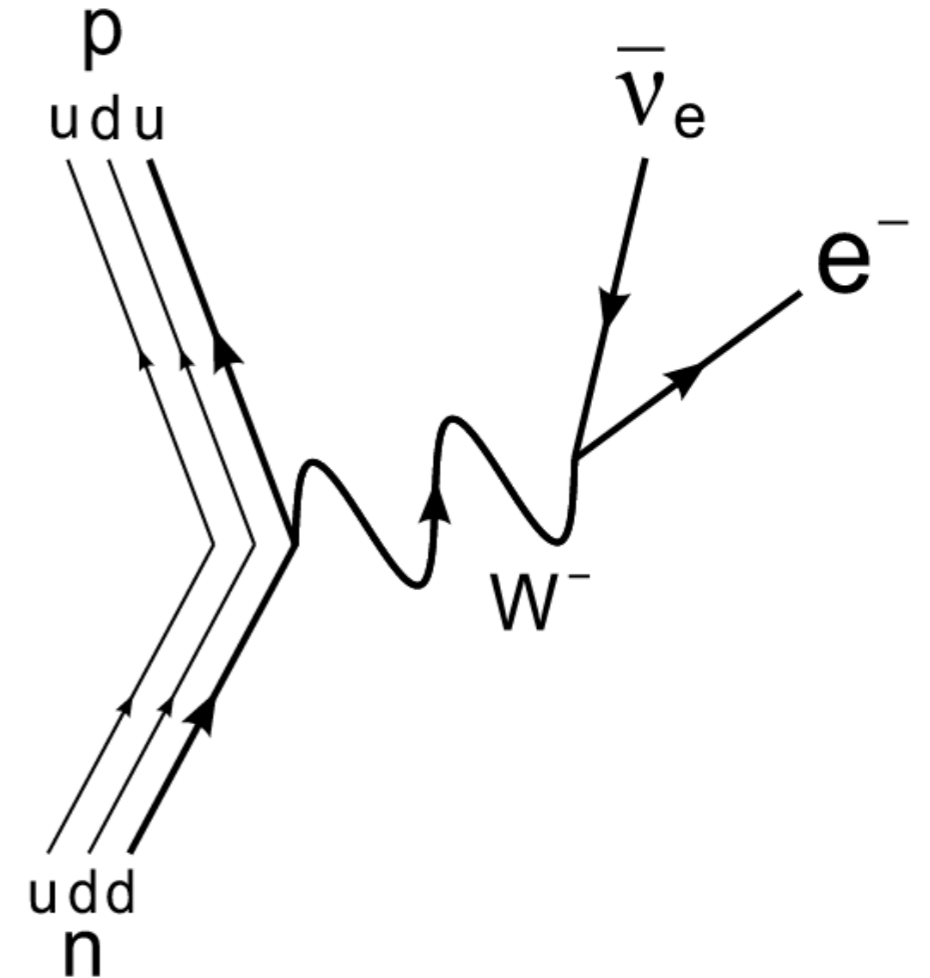


Kütlesi olan maddeler arasındaki etkileşimdir. Gezegenleri, yıldızları, galaksileri bir arada tutar.

# Zayıf Etkileşim

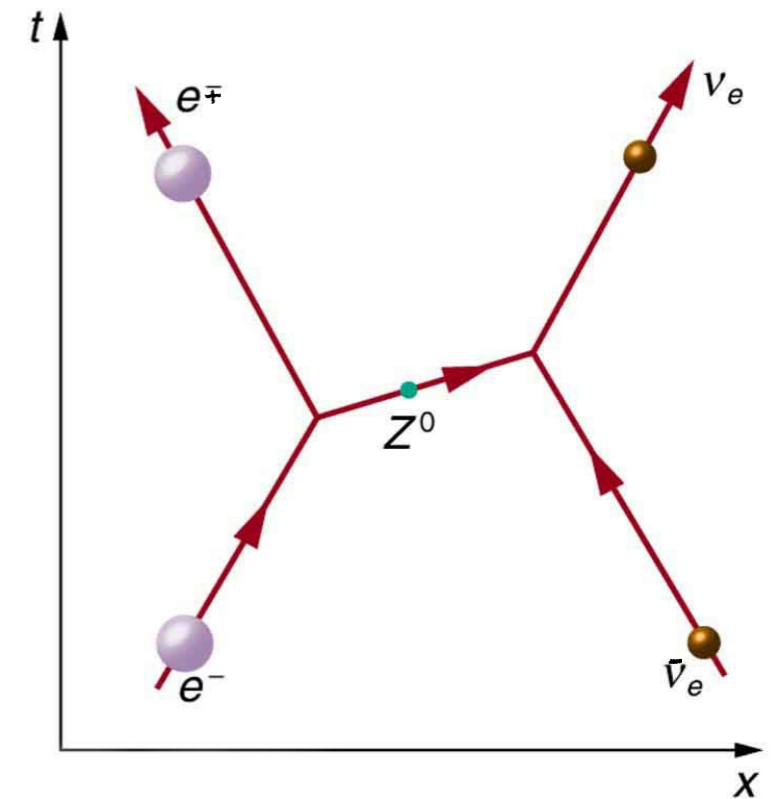
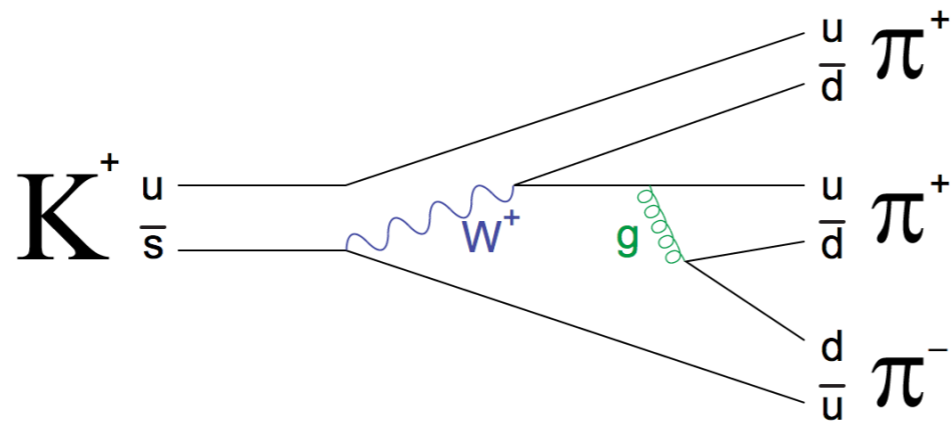
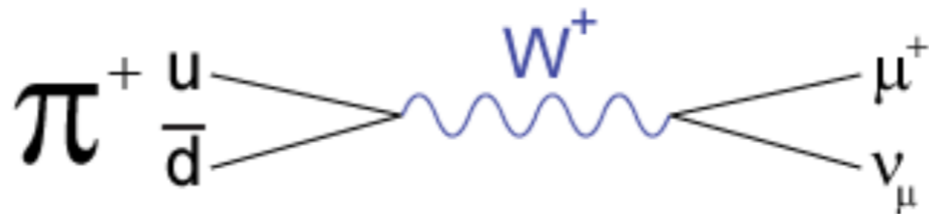
## KUANTUM ÇEŞNİ DİNAMİĞİ

- Kuarkların çeşnilerini KÇD ile değişir
- Etkileşim kısa menzillidir ( $10^{-18}$  m)
- Taşıyıcı parçacıkları kütle sahibidir
  - $M_Z = 90 \text{ GeV}/c^2$
  - $M_W = 81 \text{ GeV}/c^2$
  - Demir atomundan ağır



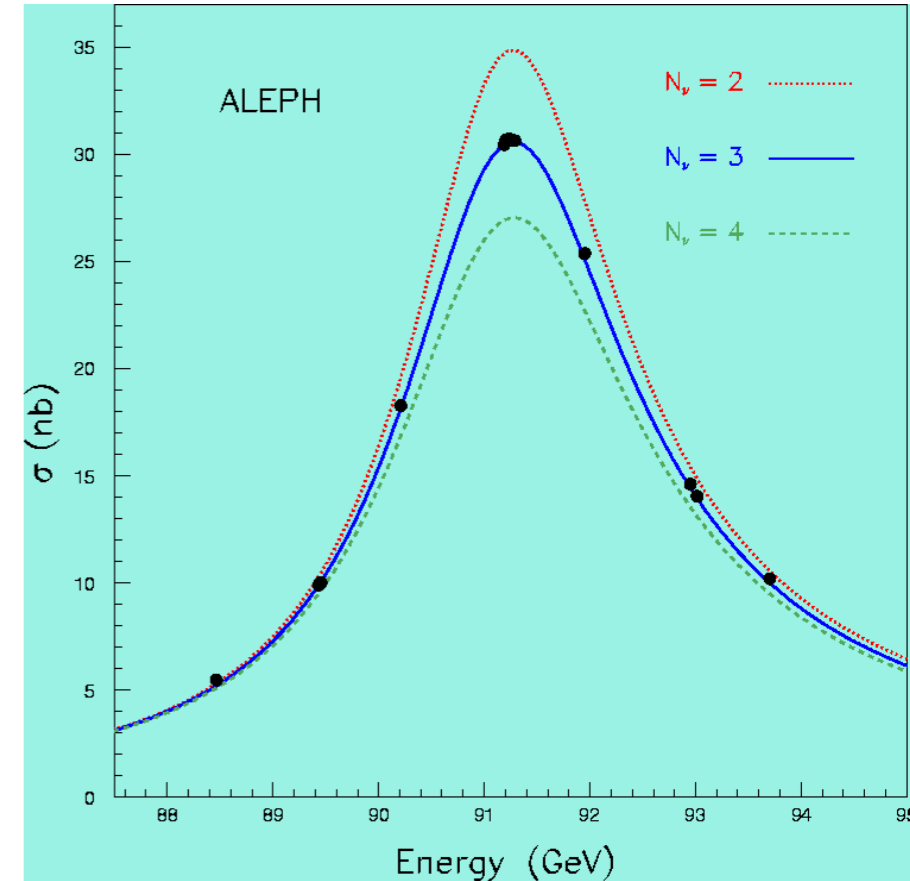
# Kuantum Çeşni Dinamiği

## Örnekler



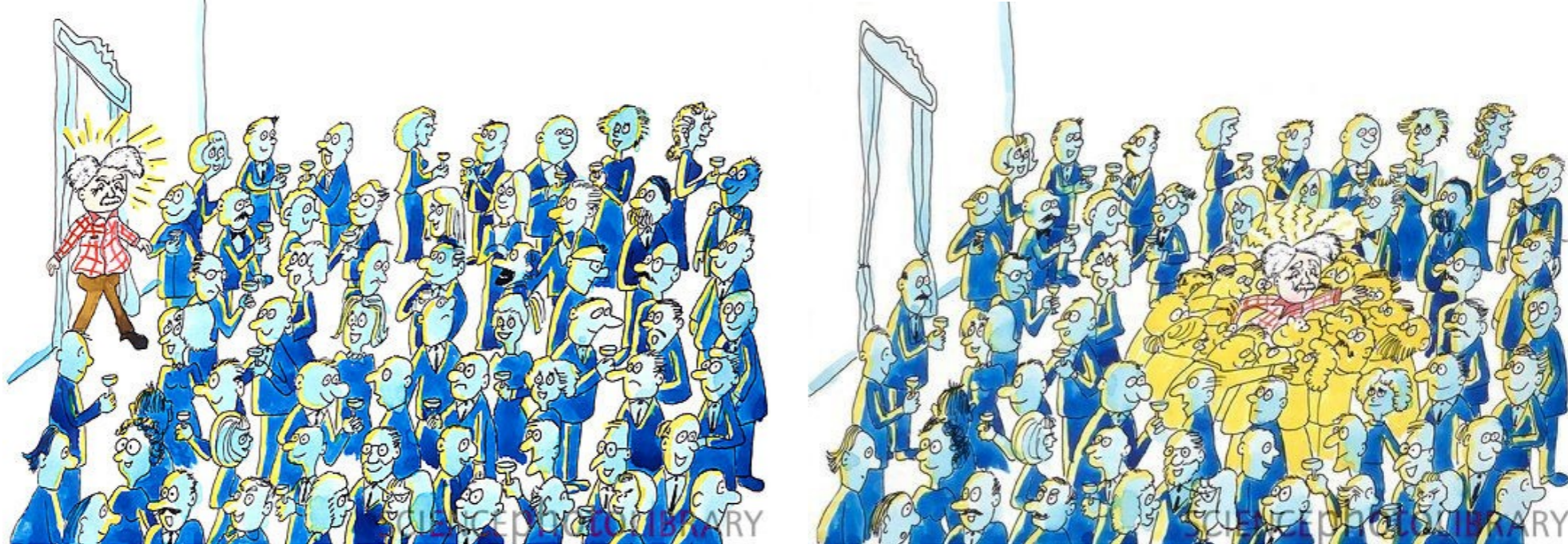
# W, Z Bozonları

- UA1 ve UA2 takımlarınca CERN'de 1983 yılında keşfedildiler
  - 1968 yılında Glashow, Weinberg, Salam tarafından önerilmişlerdi
  - SLAC (ABD) / LEP1 ve LEP2 ayrıntılı olarak incelendiler
- $W^+$ ,  $W^-$  birbirinin karşı parçacığıdır
- Z elektriksel olarak yüksüzdür ve kendisinin karşı parçacığıdır
- Yarı ömürleri yaklaşık  $3 \times 10^{-25}$  s
  - W %11 olasılıkla elektron ve elektron nötrinosuna bozunuyor
  - Z %20 olasılıkla nötrino - antinötrino çiftine bozunuyor





# Higgs Mekanizması

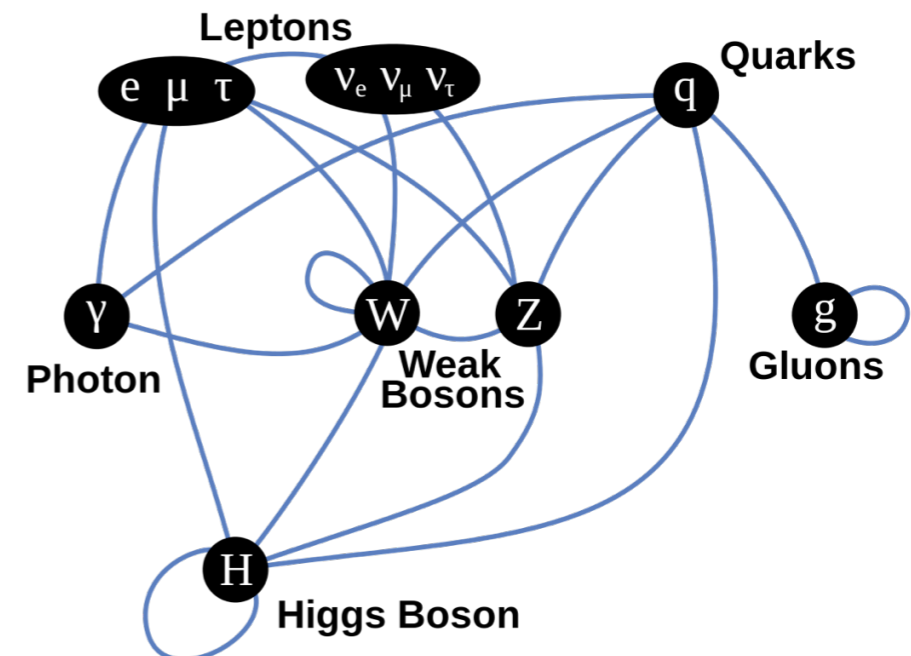


- Fermiyonlar Higgs alanıyla yaptıkları etkileşimiyle kütle kazanırlar
- W, Z bozonları kütle kazanırlar
- Elektromanyetik alan Higgsle etkileşmez ve bu yüzden foton kütesizdir
- Higgs bozonu bu mekanizmanın bir sonucudur
- Higgs bozonu 4 Temmuz 2012'de CERN'deki ATLAS ve CMS deneylerinde gözlemlenmiştir

# Standart Model

- Elektromanyetik, güçlü ve zayıf etkileşimleri açıklayan ve temel parçacıkları sınıflandıran bir teoridir
- Kütle-çekim etkileşmesini açıklamaz
- Kuark ve leptonlardan oluşan 3 aile ve bunların karşı-parçacıklarını tanımlar
- Çekirdekler, atomlar fermiyonları uygun şekilde karıştırarak yapılır:
  - $p \approx uud$   $n \approx udd$
  - Hidrojen  $\approx p+e$ ,
  - Helyum  $\approx n+n+p+p+e+e$
- Fermiyonlar bozonlar sayesinde etkileşir
- Standart Modelin cevaplayamadığı daha birçok soru bulunmaktadır
  - Karanlık madde, kütle hiyerarşisi, 3 parçacık ailesi, kütle çekim etkileşmesinin diğer etkileşmelere göre daha zayıf olması, madde-karşımadde asimetrisi....

	mass →	$\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.07 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 126 \text{ GeV}/c^2$
charge →		$2/3$	$2/3$	$2/3$	0	0
spin →		$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	0
		<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top	<b>g</b> gluon	<b>H</b> Higgs boson
<b>QUARKS</b>		$4.8 \text{ MeV}/c^2$	$95 \text{ MeV}/c^2$	$4.18 \text{ GeV}/c^2$	0	
		$-1/3$	$-1/3$	$-1/3$	0	
		$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	
		<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom	<b><math>\gamma</math></b> photon	
		$0.511 \text{ MeV}/c^2$	$105.7 \text{ MeV}/c^2$	$1.777 \text{ GeV}/c^2$	$91.2 \text{ GeV}/c^2$	
		-1	-1	-1	0	
		$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	
		<b>e</b> electron	<b><math>\mu</math></b> muon	<b><math>\tau</math></b> tau	<b>Z</b> Z boson	
<b>LEPTONS</b>		$< 2.2 \text{ eV}/c^2$	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	$< 15.5 \text{ MeV}/c^2$	$80.4 \text{ GeV}/c^2$	
		0	0	0	$\pm 1$	
		$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	
		<b><math>\nu_e</math></b> electron neutrino	<b><math>\nu_\mu</math></b> muon neutrino	<b><math>\nu_\tau</math></b> tau neutrino	<b>W</b> W boson	
						<b>GAUGE BOSONS</b>



# Parçacık Fiziği Birimleri

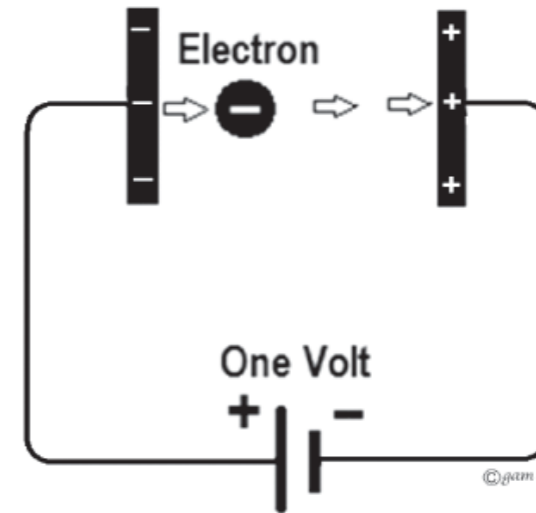
- **Joules parçacık enerjileri için çok büyük bir birim**
- Daha kullanışlı birimlere ihtiyacımız var
  - *eV, keV, MeV, GeV, TeV...*
- **eV (elektronvolt) nedir?**
  - Bir elektronun, bir voltluk elektrostatik potansiyel farkı katederek kazandığı kinetik enerji miktarıdır

$$\text{Enerji} = \text{Yük} \times \text{Volt} = \text{eV (elektronvolt)}$$

$$1 \text{ eV} = (1.6 \times 10^{-19} \text{ C})(1 \text{ J/C})$$

$$1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$$

- volt (V) = Joule (J)/ Coulomb (C)
- $e$  = electron charge =  $1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$



- **70 kg kütleli birisinin yürürken (saniyede ~1 adım) sahip olduğu kinetik enerji:**

$$K = \frac{1}{2}mv^2 = 20 \text{ J}$$

- Yani yürürken kinetik enerjimiz:

$$\begin{aligned} 20 \text{ J} &= 1.25 \times 10^{20} \text{ eV} \\ &= 1.25 \times 10^8 \text{ TeV} \end{aligned}$$

# Parçacık Fiziği Birimleri

- **Enerji:** GeV
- **Momentum:** GeV/c
- **Zaman:** (GeV/ħ)<sup>-1</sup>
- **Kütle:** GeV/c<sup>2</sup>
- **Alan:** (GeV/ħc)<sup>-2</sup>
- **Uzunluk:** (GeV/ħc)<sup>-1</sup>

**ħ=c=1** alsak herşey ne basit olur!

**Ve böylece bütün nicelikler GeV'nin kuvvetleri cinsinden ifade edilir**

**S.I'nın birimlerine geri dönüştürme için, ħ ve c'nin gerekli çarpanları kullanılır**

$$l_P = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}} \approx 1.616\,199(97) \times 10^{-35} \text{ m}$$

$$t_P \equiv \sqrt{\frac{\hbar G}{c^5}} \approx 5.391\,16(13) \times 10^{-44} \text{ s}$$

$$m_P = \sqrt{\frac{\hbar c}{G}} \approx 1.2209 \times 10^{19} \text{ GeV}/c^2 = 2.176\,51(13) \times 10^{-8} \text{ kg}$$

$$E_P = \sqrt{\frac{\hbar c^5}{G}} \approx 1.956 \times 10^9 \text{ J} \approx 1.22 \times 10^{28} \text{ eV}$$