

# TÖÇ-6

## Parçacık Fizikine giriş

Gökhan ÜNEL / UCI - Haziran 2016



# Çıkış noktası

- \* Yaşadığım bu yerde bir sebep-sonuç ilişkisi var.
  - \* Bilinçliyen deneyimlediklerime gerçek diyorum.
- \* Yaşadığım bu yeri anlayabilirim.
  - \* Gözlem ve deney yapanları dinleyeyim.
- \* Gözlemler / deneyler gerçekle ilgili olması gerekenler:
  - \* Tekrarlanabilir / Yalanlanabilir.
  - \* Sınıflandırılabilir.
- \* Karmaşık konuları anlama yöntemleri:
  - \* ~~Bütünü anlayana kadar çalışayım. Tümünden küçük parçalara geçeyim.~~
  - \* Bütünü oluşturan parçaları ve onların birbiri ile ilişkisini anlayım, bunlardan tüme varayım.



Doğadaki maddeyi ve çeşitli etkileşimlerin alt yapısını anlamak.

kısacası: her şeyi anlamak



önce sınıflandıralım



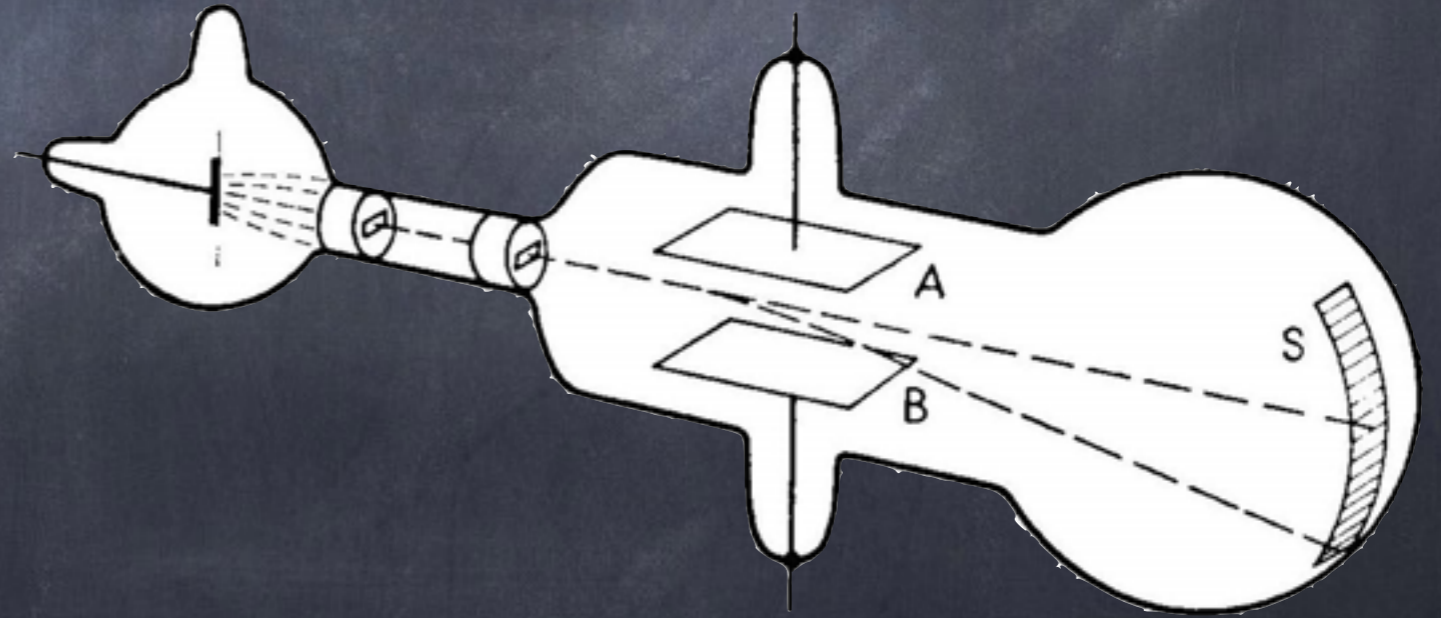
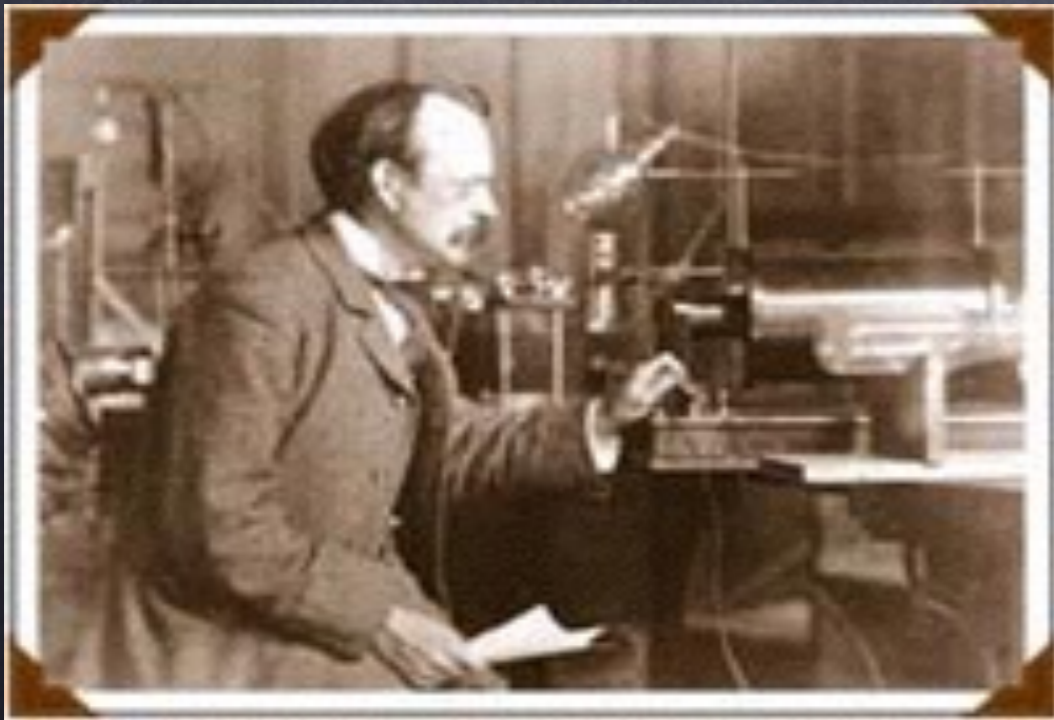




# İLK PARÇACIK 1897

Parçacık Fiziği macerası J.J.Thomson'ın elektronu keşfetmesiyle başlar.

Sıcak bir telden yayılan katot ışınlarının (parçacık demeti) bir mıknatis ile saptırılabilmesi ile bunların elektrik yükü taşıdığı, ve bükülme yönünden de bu yükün eksi olduğu belirlenmiştir.





Atomun içinde ne var?

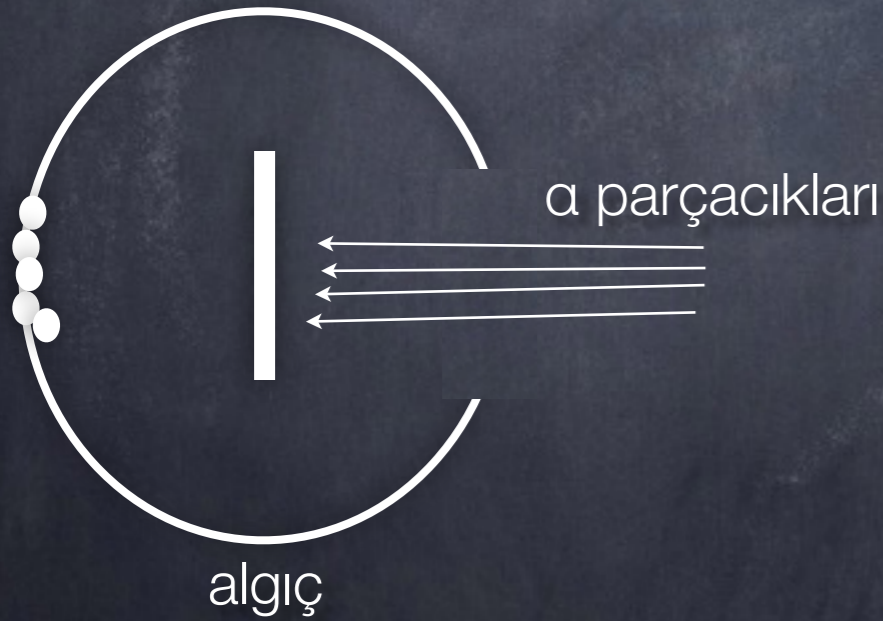
**JJ Tomson (1904)**

Atom, içinde artı ve eksi elektrik yükü olan bir karışım olabilir.

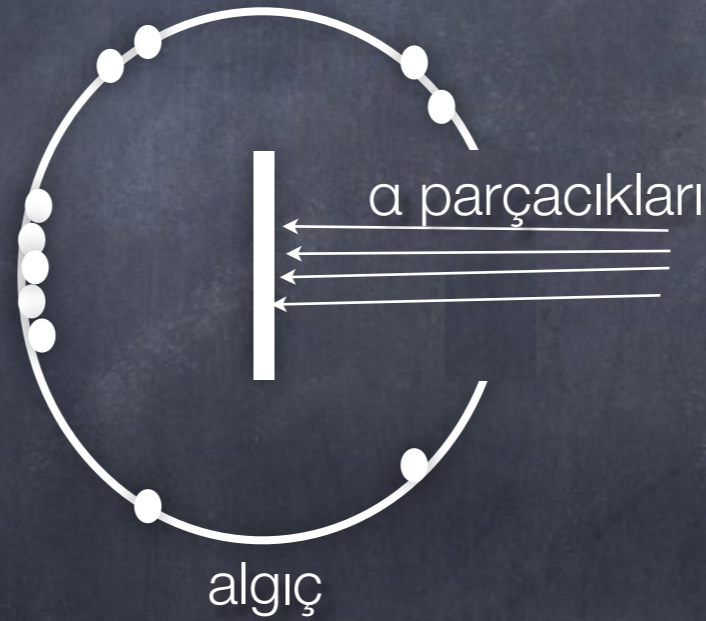


# Atom çekirdeği

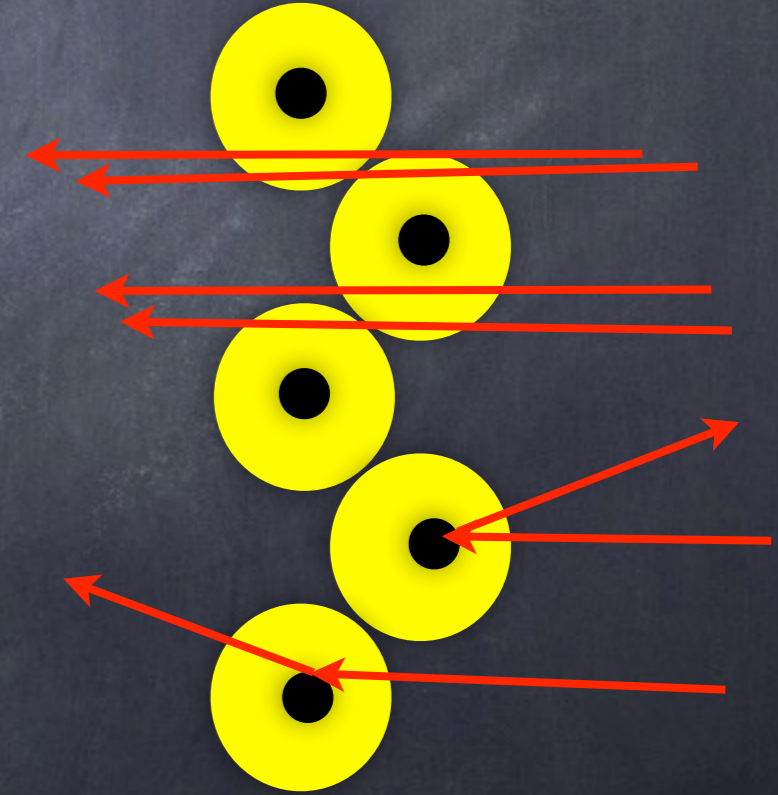
*Ernest Rutherford*, 1909'da varsayımın geçerliliğini test etmek için bir deney hazırladı. Fizikçiler ilk kez mikroskopla göremedikleri küçük parçacıkların içini araştırdılar.



**beklenen**



**gözlenen**



**açıklama**

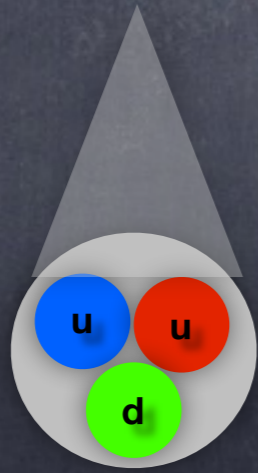
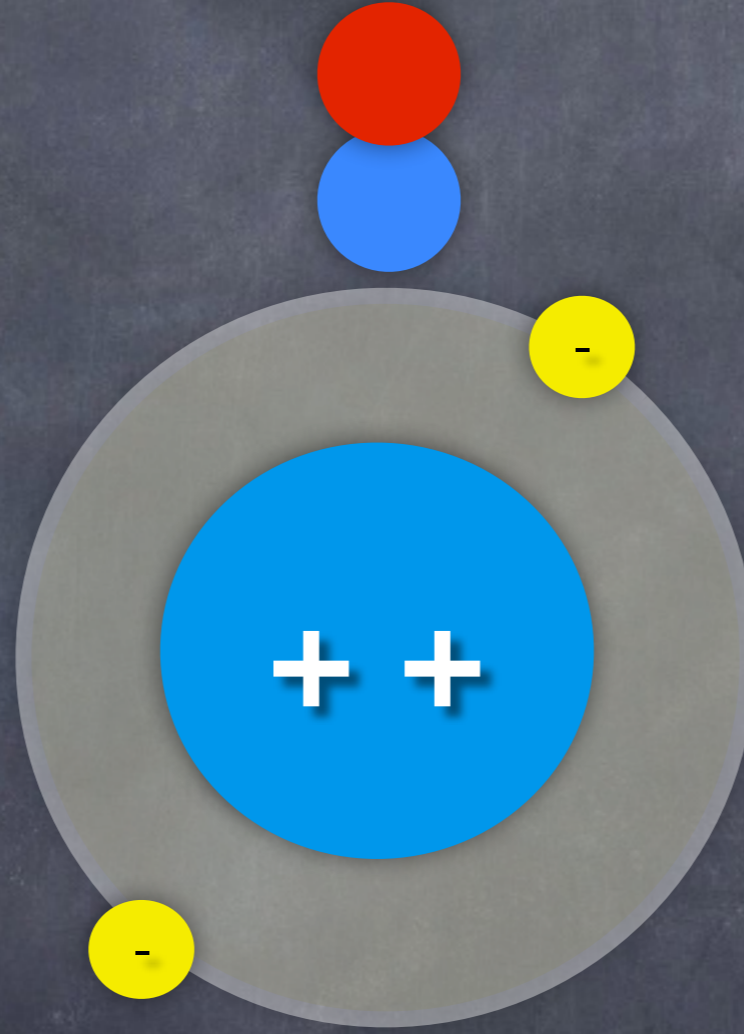


# Çekirdek Nedir?



Lisa Meitner

çekirdeğin parçalanabildiğini gösteren kişi



Proton



Nötron

En basit atom modeli: çekirdek etrafında yörüngede olan elektronlar.

Atom çekirdeği parçalanabiliyor mu?

Bu tanıma göre madde çekirdek ve elektronlardan oluşuyor.

Çekirdeğin içinde protonlar ve nötronlar varmış.  
Onların içinde de kuarklar var.

1938

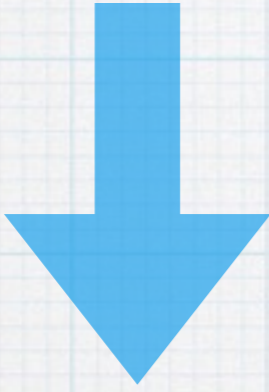
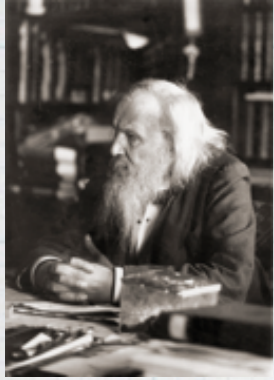


# her cisim

katı

sıvı

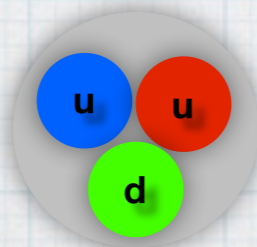
gaz



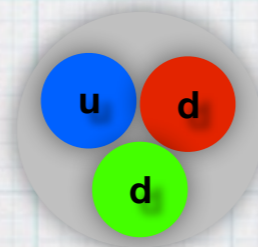
# atomlar



Elektron



Proton



Nötron



# her olay

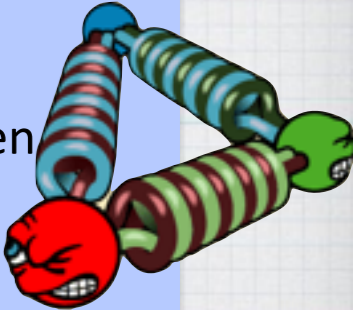
Kimyasal bir sürü tepkime var.  
Elim masadan geçmiyor.  
Şimşek oluyor.



Güneş ve yıldızlar parlıyor.  
Dünyanın yaşı basitçe hesaplanmıyor.



Elementlerin çekirdeklerinde birbirini iten  
yükler nasıl bir arada duruyor?



Taş atınca yere düşüyor.  
Yıldızlar kafama düşmüyor.





# Temel Etkileşimler

## Elektromanyetik etkileşim



Elektrik, mıknatıslık: atomun içindeki elektronları çekirdeğe bağlar, atomları moleküllere bağlar, tüm kimyasal etkileşimlerden sorumludur, vs.

## Güçlü etkileşim



Kuarkları bağlayıp protonları, nötronları ve diğer parçacıkları yapar. Atomun içindeki proton ve nötronların arasındaki itici kuvveti yenerek çekirdeği bağlar.

## Zayıf etkileşim



Radyoaktiviteden sorumludur. Ayrıca Güneş ve diğer yıldızların merkezinde olan nükleer tepkimelere sebep verir.

## Kütleçekim etkileşimi



Kütlesi olan tüm maddenin arasında olan çekim kuvveti. Bizi Dünya'ya bağlar, yıldızları ve galaksileri birarada tutar.



## Higgs etkileşimi

Temel fermiyonların ve zayıf etkileşim taşıyıcısı bozonların kütle kazanmasından sorumludur.



# Temel Parçacıklar

## Maddenin Üç Ailesi

Etrafımızdaki cisimleri  
oluşturanlar

Erken evrende ve  
laboratuarda olanlar

### \* Yapıtaşları

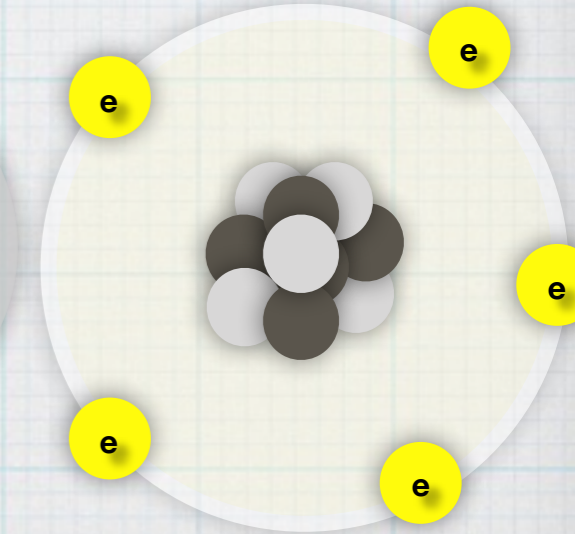
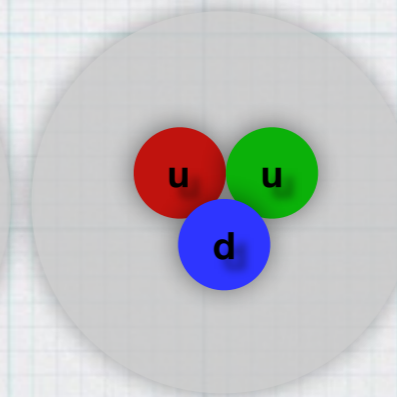
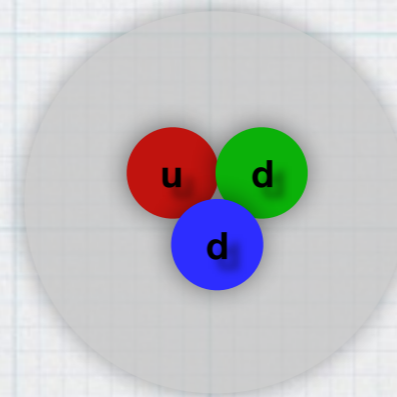
- \* Kuarklar: u, c, t, d, s, b
- \* Leptonlar:  $\nu_e$ ,  $\nu_\mu$ ,  $\nu_\tau$ , e,  $\mu$ ,  $\tau$
- \* ve bunların karşı-parçacıkları

\*  $e^- \rightarrow e^+$

\*  $u \rightarrow \bar{u}$

\*  $\nu_e \rightarrow \bar{\nu}_e$

Kuarklar	1. aile	2. aile	3. aile
kütle $\rightarrow$	2.4 MeV/c <sup>2</sup>	1.27 GeV/c <sup>2</sup>	171.2 GeV/c <sup>2</sup>
yük $\rightarrow$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$
dönme $\rightarrow$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
isim $\rightarrow$	<b>u</b> yukarı	<b>c</b> tılsım	<b>t</b> üst
	<b>d</b> aşağı	<b>s</b> garip	<b>b</b> alt
	$<2.0$ eV/c <sup>2</sup>	$<0.19$ MeV/c <sup>2</sup>	$<18.2$ MeV/c <sup>2</sup>
	0	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
	<b><math>\nu_e</math></b> elektron nötrino	<b><math>\nu_\mu</math></b> müon nötrino	<b><math>\nu_\tau</math></b> tau nötrino
	0.511 MeV/c <sup>2</sup>	105.7 MeV/c <sup>2</sup>	1.777 GeV/c <sup>2</sup>
	-1	-1	-1
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
	<b>e</b> elektron	<b><math>\mu</math></b> müon	<b><math>\tau</math></b> tau



☀️ Atomlar yukardakileri uygun şekilde karıştırılarak yapılır.

n Nötron p Proton



# bir QM özellik: Dönü (spin)

devamlı değil kesikli değerler alabilir: "Kuantumlu"

$\frac{1}{2}, 1\frac{1}{2}, \dots$

$0, 1, 2, \dots$

## Fermi-Dirac

elektron

Pauli dışlama ilkesi  
orbitaller

Fermiyon

madde yapıtaşı parçacıklar

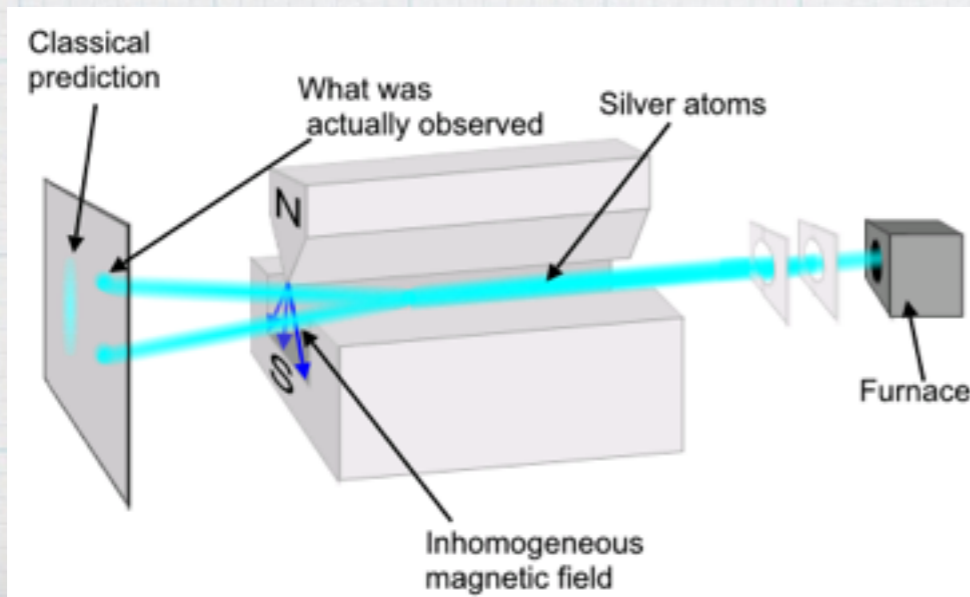
## Bose-Einstein

foton

Boze yığılması  
lazer

Boson

kuvvet iletici parçacıklar



Stern - Gerlach Deneyi 1922

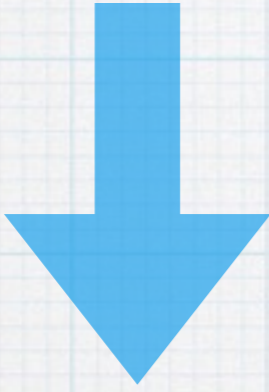
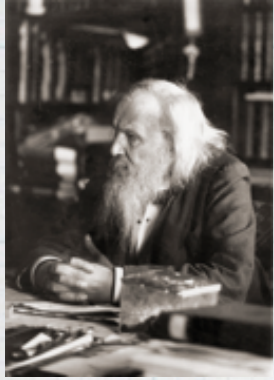


# her cisim

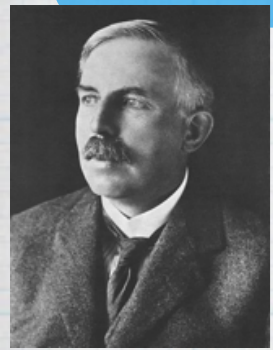
katı

svı

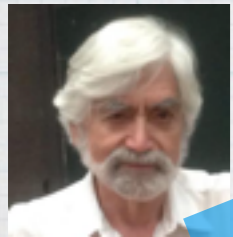
gaz



# atomlar



	1. aile	2. aile	3. aile
<b>Kuarklar</b>			
kütle →	2.4 MeV/c <sup>2</sup>	1.27 GeV/c <sup>2</sup>	171.2 GeV/c <sup>2</sup>
yük →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$
dönü →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
isim →	<b>u</b> yukarı	<b>c</b> tılsım	<b>t</b> üst
	4.8 MeV/c <sup>2</sup>	104 MeV/c <sup>2</sup>	4.2 GeV/c <sup>2</sup>
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
	<b>d</b> aşağı	<b>s</b> garip	<b>b</b> alt
<b>Leptonlar</b>			
kütle →	<2.0 eV/c <sup>2</sup>	<0.19 MeV/c <sup>2</sup>	<18.2 MeV/c <sup>2</sup>
yük →	0	0	0
dönü →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
isim →	<b>ν<sub>e</sub></b> elektron nötrino	<b>ν<sub>μ</sub></b> müon nötrino	<b>ν<sub>τ</sub></b> tau nötrino
	0.511 MeV/c <sup>2</sup>	105.7 MeV/c <sup>2</sup>	1.777 GeV/c <sup>2</sup>
	-1	-1	-1
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
	<b>e</b> elektron	<b>μ</b> müon	<b>τ</b> tau



# her olay

## Elektromanyetik etkileşim

Kimyasal bir sürü tepkime var.  
Elim masadan geçmiyor.  
Şimşek oluyor.



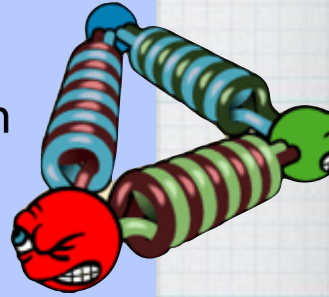
## Zayıf etkileşim

Güneş ve yıldızlar parlıyor.  
Dünyanın yaşı basitçe hesaplanmıyor.



## Güçlü etkileşim

Elementlerin çekirdeklerinde birbirini iten yükler nasıl bir arada duruyor?



## Kütleçekim etkileşimi

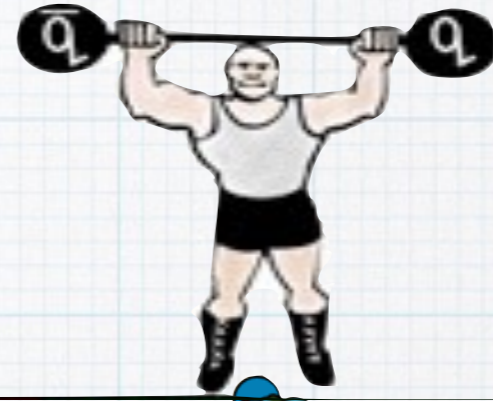
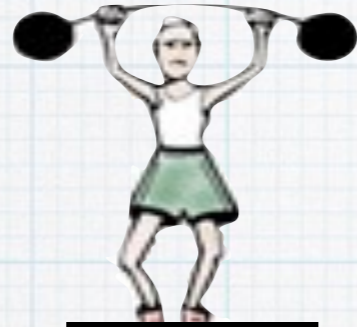
Taş atınca yere düşüyor.  
Yıldızlar kafama düşmüyor.





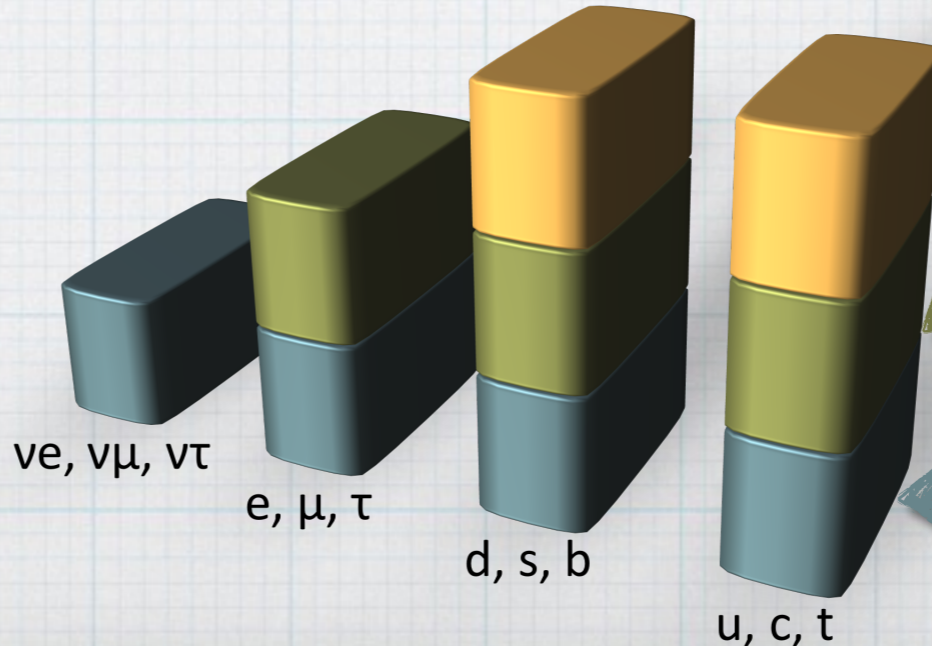
# Etkileşimleri Sağlayan Parçacıklar

## Bozonlar



Kuvvet	Çekim	Zayıf	Elektromanyetik	Güçlü
Taşıyıcı Parçacık	Graviton (henüz gözlenmedi)	$W^+ W^- Z^0$	Photon	Gluon (8)
etkileştikleri	hepsi	kuarklar ve leptonlar	kuarklar, yüklü leptonlar, $W^+ W^-$	kuarklar ve gluonlar
Kütle (GeV)	0?	80 - 91	0	0

- Güçlü etkileşim
- Elektromanyetik etkileşim
- Zayıf etkileşim



125.1 GeV/c<sup>2</sup>  
0 0  
**H<sup>0</sup>**  
Higgs bosonu

0 0 1  
**γ** EM  
foton

0 0 1  
**g** GK  
gluon

91.2 GeV/c<sup>2</sup>  
0 1  
**Z** ZK  
Z bosonu

80.4 GeV/c<sup>2</sup>  
±1 1  
**W<sup>±</sup>** ZK  
W bosonu



# karşı-parçacık olayı

- \* her parçacığın kendisine zıt kuantum mekaniksel özellikler taşıyan bir düşman kardeşi vardır.
- \* buna karşı-parçacık denir
- \* parçacık + karşı-parçacık = enerji = yeni parçacık
- \* Örnekler:
  - \* elektron(-) & pozitron(+) en basiti: yük ters olmuş
  - \*  $u$  ( $2/3$ ) &  $\bar{u}$  ( $-2/3$ ) benzer şekilde
  - \*  $\nu_e$  &  $\bar{\nu}_e$  : lepton numarası ters olmuş
  - \*  $r$  &  $\bar{r}$  : renk yükü ters olmuş

karşı parçacıkları da sayarsak toplamda **61** temel parçacık var



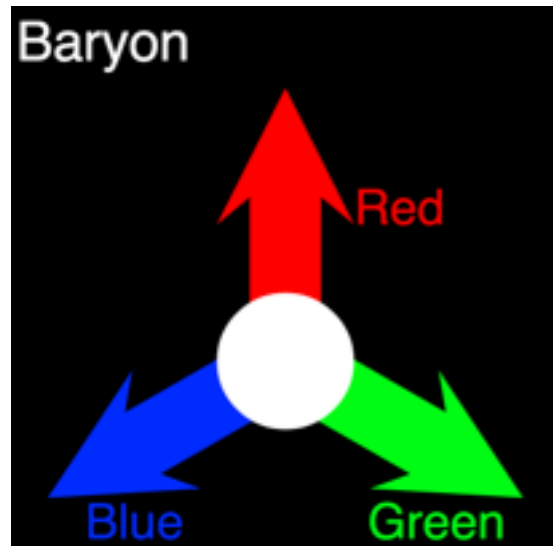
# HADRONLAR

Kuarklardan yapılmış ve güçlü etkileşen parçacıklar

baryonlar(qqq) ve karşı baryonlar fermiyon

simge	isim	içerik	yük	kütle	dönü
p	proton	uud	1	0.938	1/2
$\bar{p}$	karşı proton	$\bar{u}\bar{u}\bar{d}$	-1	0.938	1/2
n	nötron	udd	0	0.940	1/2
$\Lambda$	lambda	uds	0	1.116	1/2
$\Omega^-$	omega	sss	-1	1.672	3/2

yaklaşık 120 çeşit baryon var

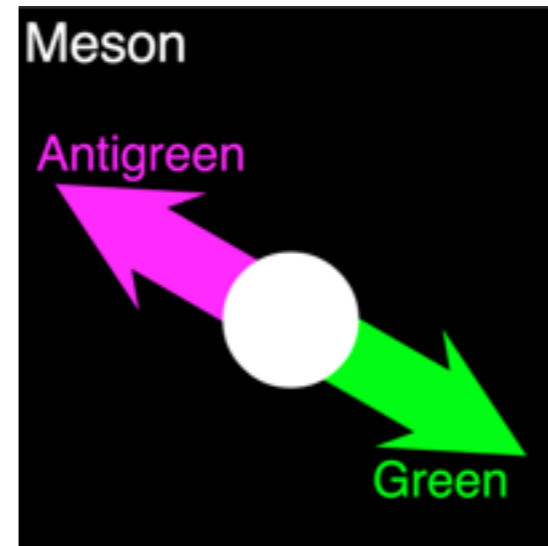


3 kuarklı hadronlar

mezonlar(qq) ve karşı mezonlar bozon

simge	isim	içerik	yük	kütle	dönü
$\pi^+$	piyon	$u\bar{d}$	1	0.140	0
$K^-$	kaon	$s\bar{u}$	-1	0.494	0
$\rho^+$	rho	$u\bar{d}$	1	0.770	1
$B^0$	B-zero	$d\bar{b}$	0	5.279	0
$\eta_c$	eta-c	$c\bar{c}$	0	2.980	0

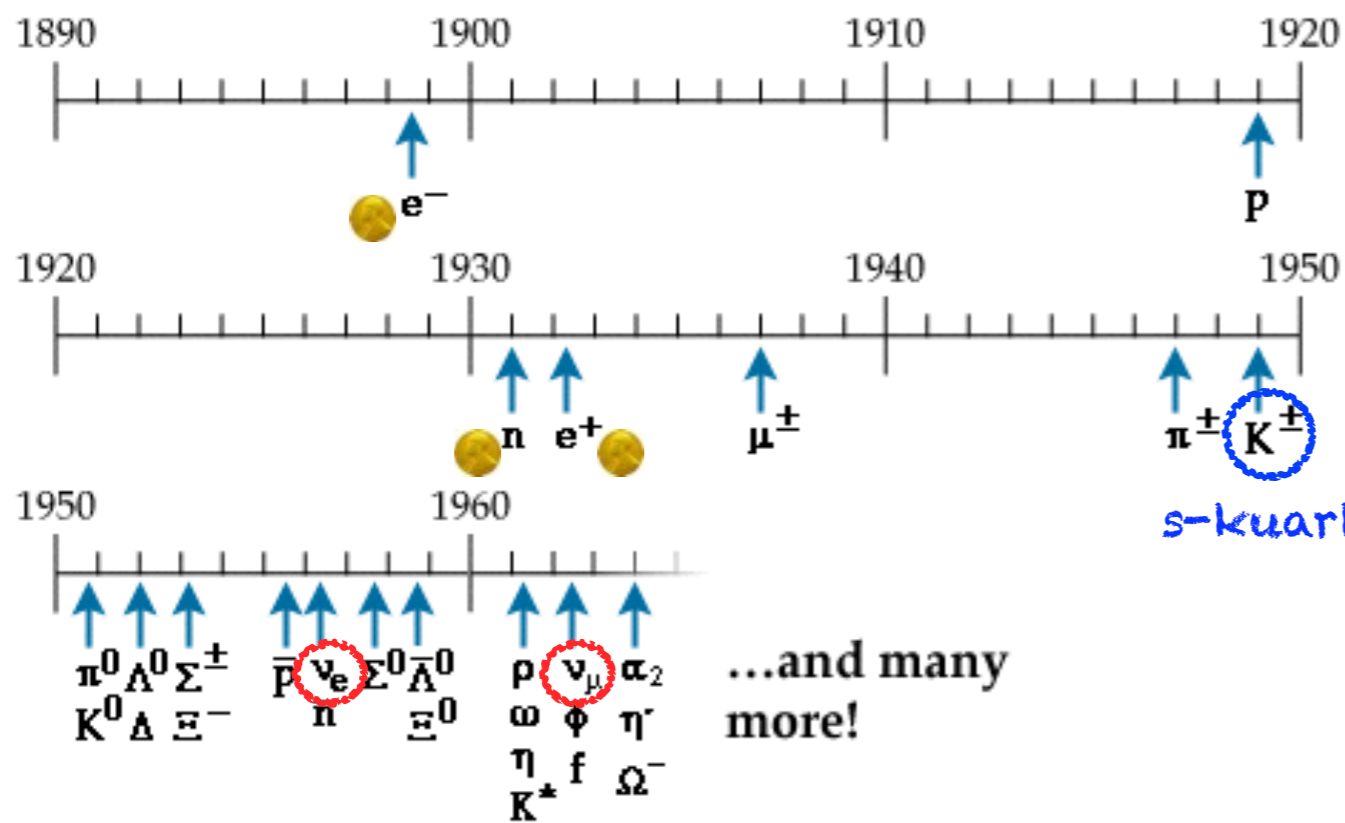
yaklaşık 140 çeşit mezon var



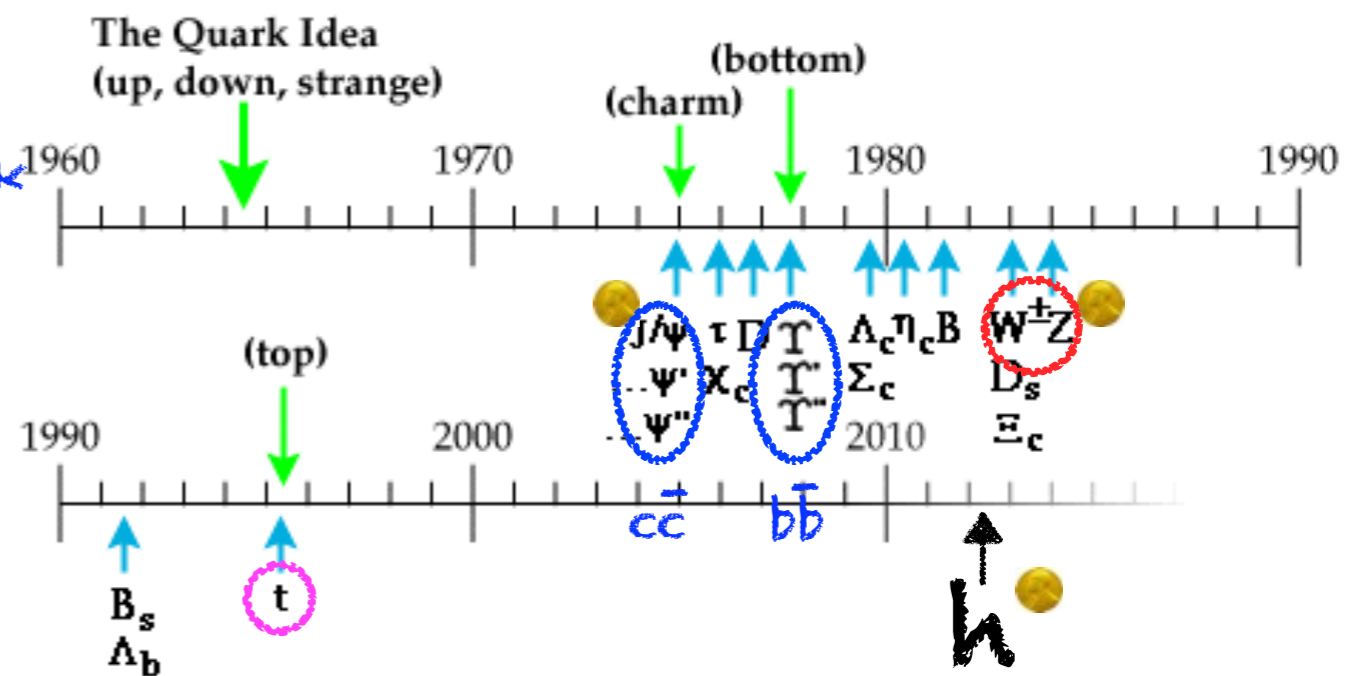
1 kuark ve 1 karşı-kuarklı hadronlar



# Önemli keşifler

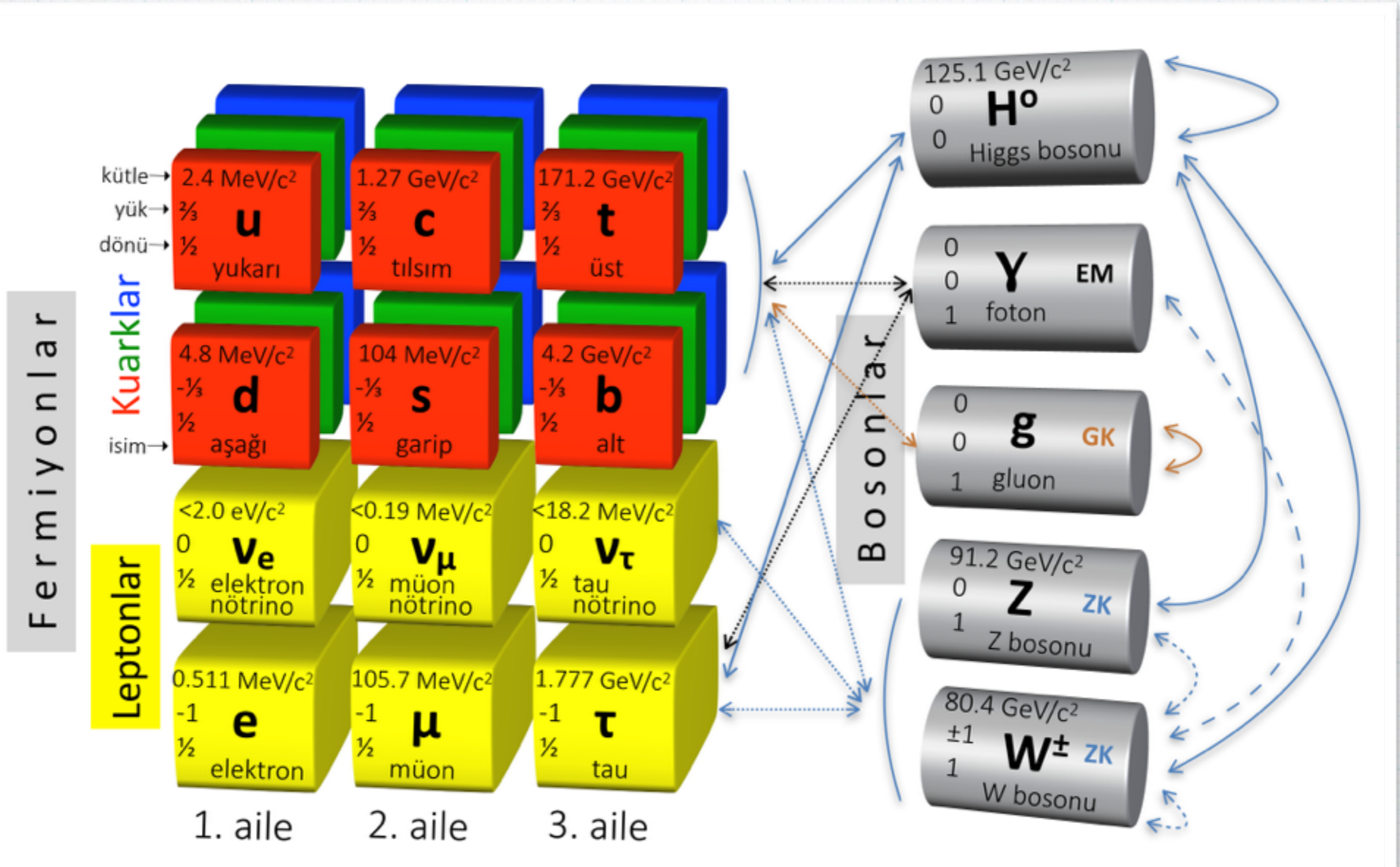


...and many more!





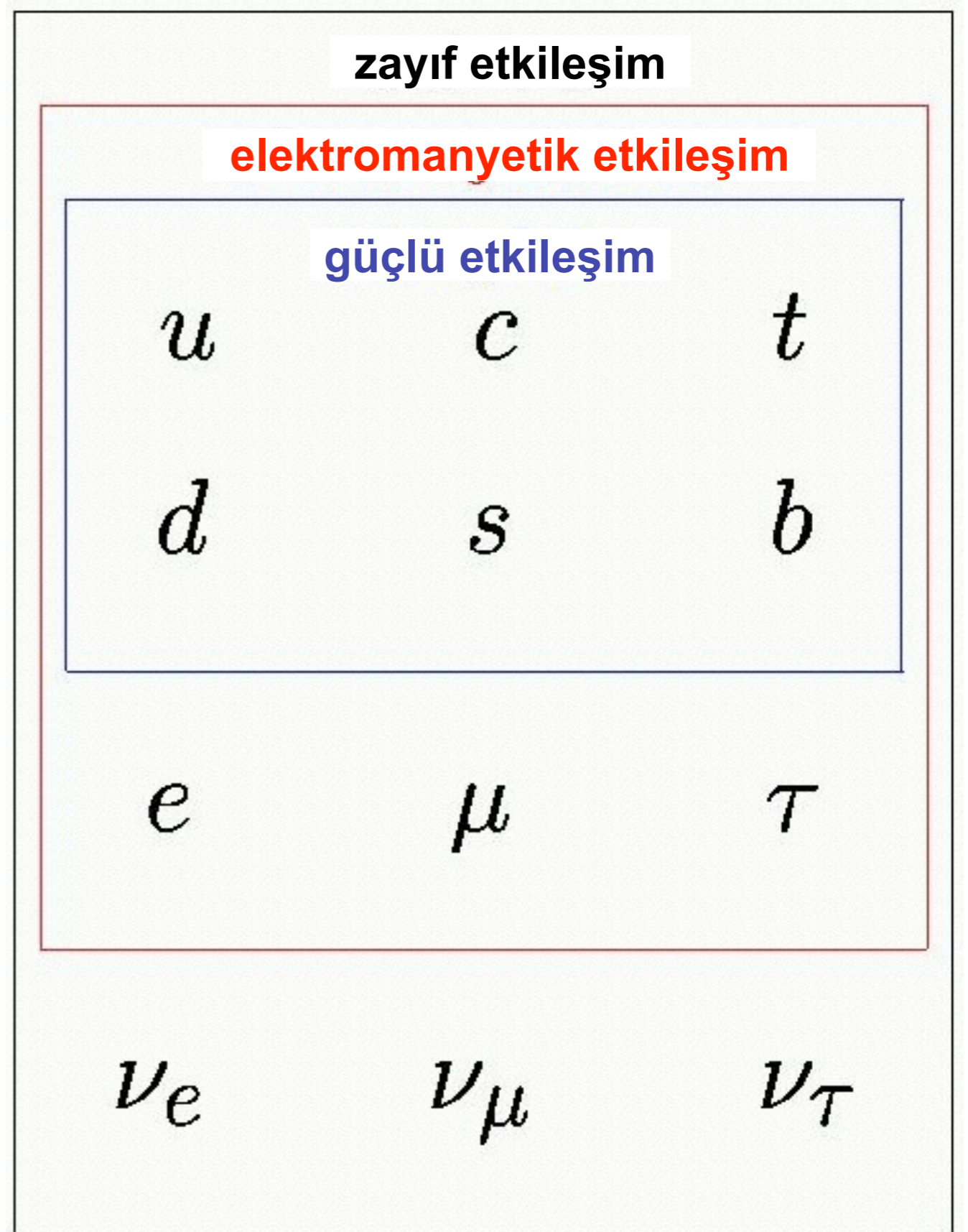
# Bilinen Parçacıklar ve Etkileşimleri





# parçacıklar ve etkileşimleri

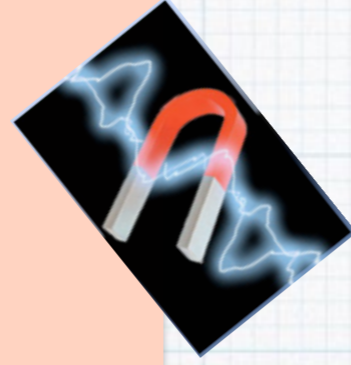
başka şekilde





# ayrıntılar

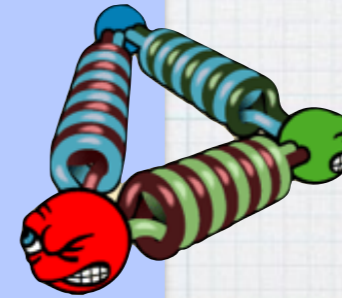
Elektromanyetizma



Zayıf etkileşim



Güçlü etkileşim



Kütleçekim etkileşimi





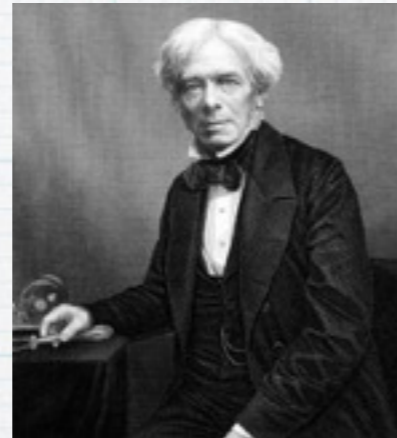
# Elektromanyetik Kuvvet



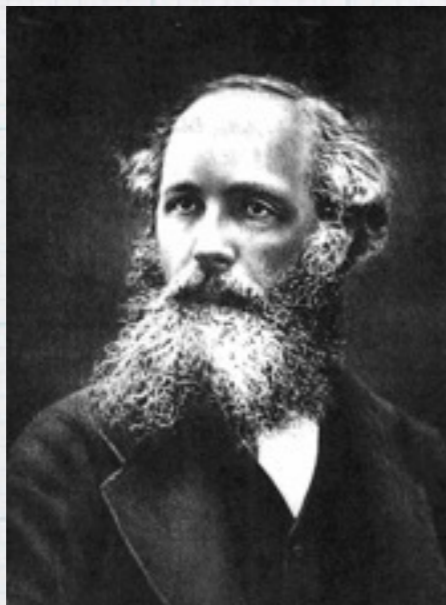
Gauss



Ampere



Faraday



James Clerk Maxwell

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

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

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

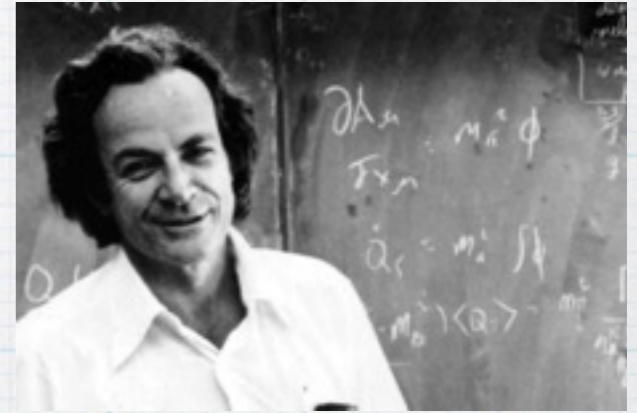
$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \left( \mathbf{J} + \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \right)$$

- $\mathbf{E}$  elektrik alan
- $\mathbf{B}$  manyetik alan
- $\mathbf{J}$  akım yoğunluğu
- $\rho$  yük yoğunluğu
- $\epsilon_0$  elektriksel geçirgenlik
- $\mu_0$  manyetik geçirimsizlik



# Kuantum Elektrodinamiği

- \* Elektrik yükü taşıyan bütün parçacıkların "foton" parçacığı aracılığıyla nasıl etkileştiğini açıklar
- \* Klasik EM'nin Kuantum halidir.
- \* Kuantum mekaniği ile özel göreliliğin bağdaştığı ilk kuramdır.
- \* Bir çok deney sonucunu yüksek duyarlılıkta (milyarda 10 hata ile) hesap etme olanağını verir.

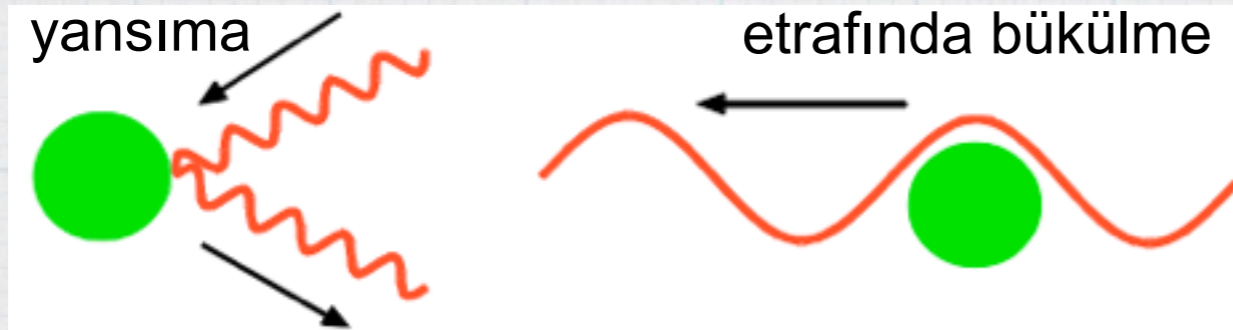


Richard  
Feynman



# foton hakkında...

- \* M.Planck, siyah cisim ışımasını açıklar (1900), ışımada kuantumludur.
- \* A.Einstein, parçacık gibi davranan ışık kuantumu önerir (1905), fotoelektrik olay ( $E \leq h\nu - w$ ), kütle ve enerjinin eşdeğerliği, özel görelilik.
- \* "Foton" ismi kimyacı Gilbert Lewis (1926) tarafından önerilir.
- \* Foton spin 1 ama kütle 0 yani 2 polarizasyonludur.



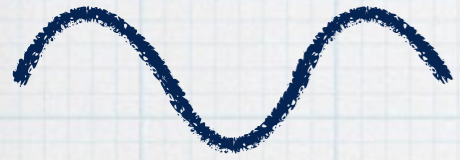
$$E = \frac{hc}{\lambda}$$

**Yüksek demet enerjisi → Daha kısa dalgaboyu → Daha iyi çözünürlük**



# Kuantum Elektrodinamiği

## Feynman çizileri



foton

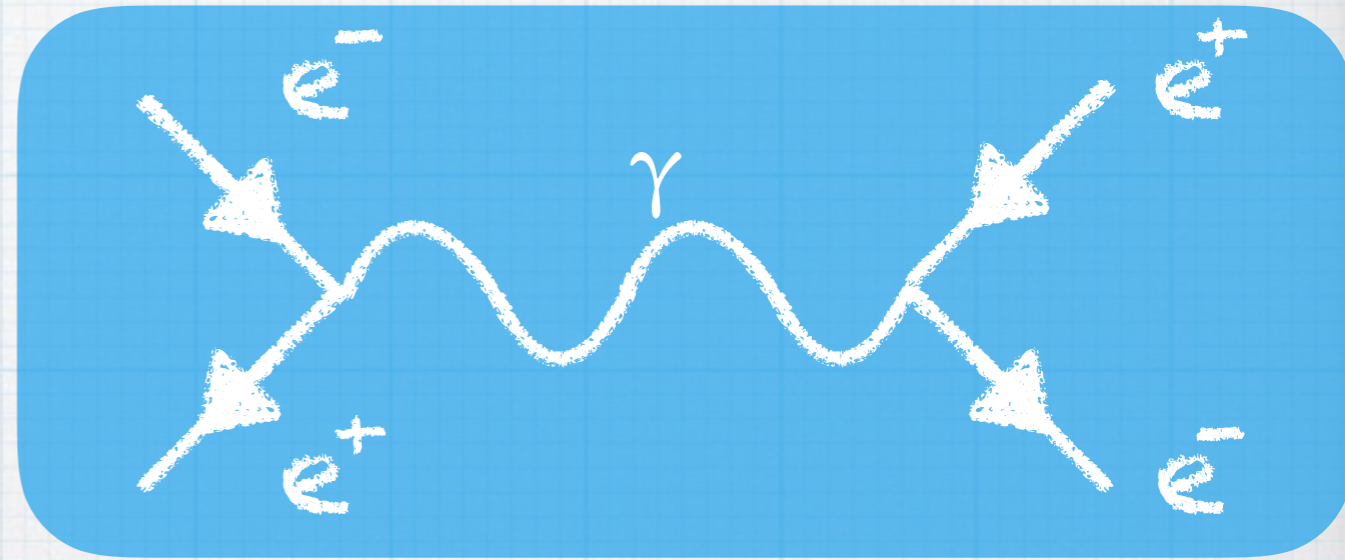


elektrik yüklü  
parçacık



elektrik yüklü  
karşı-parçacık

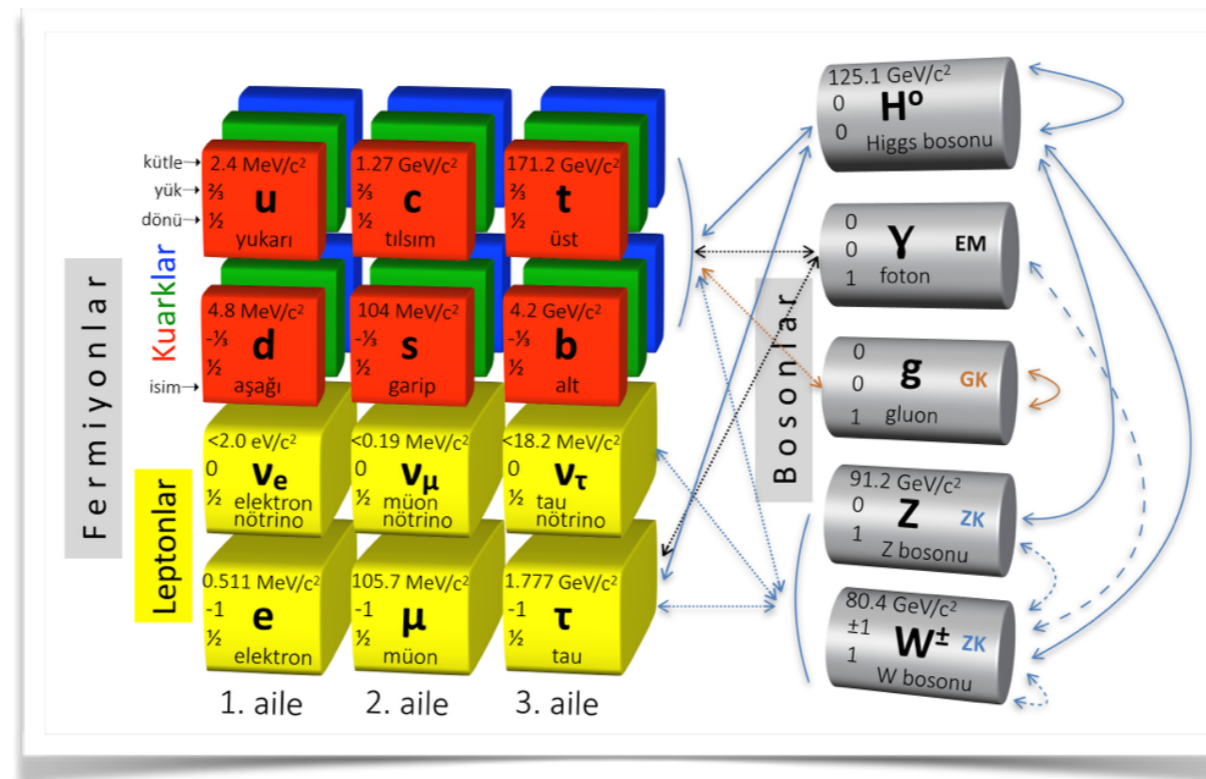
$$e^- e^+ \rightarrow e^+ e^-$$



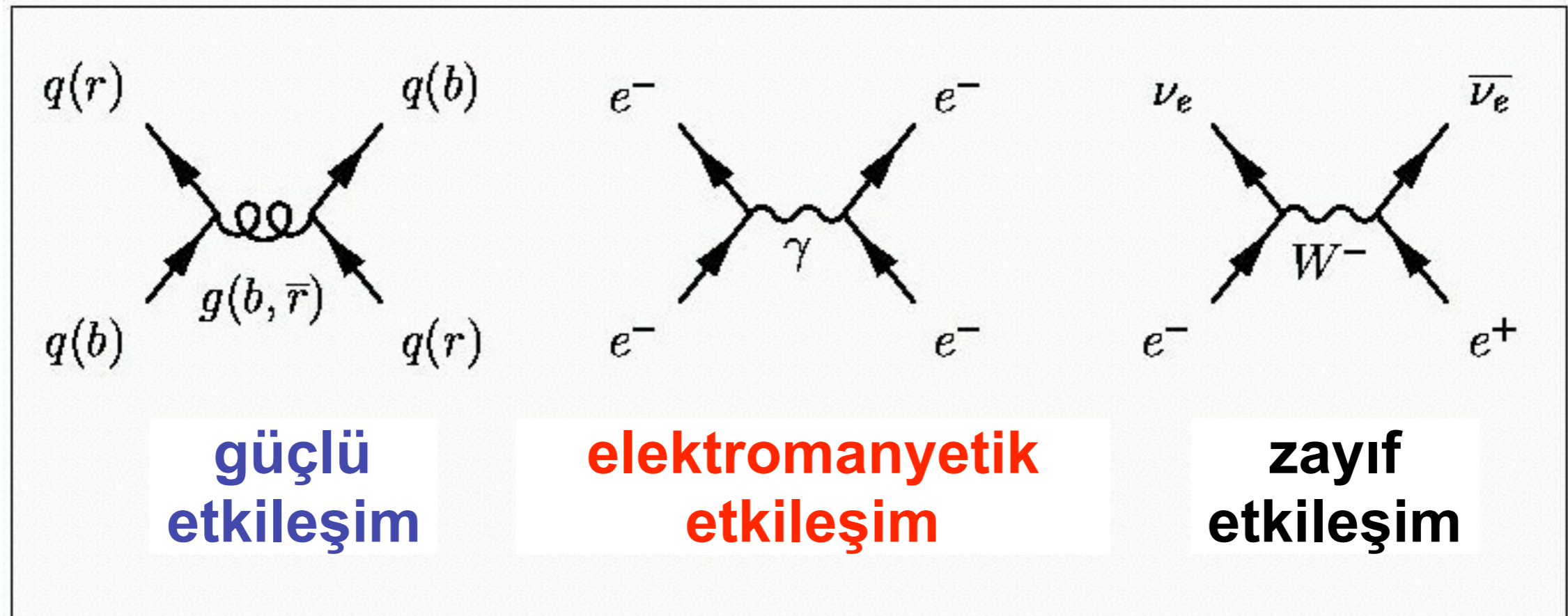
zaman

KED'in etkisi sonsuz: foton kütsesiz





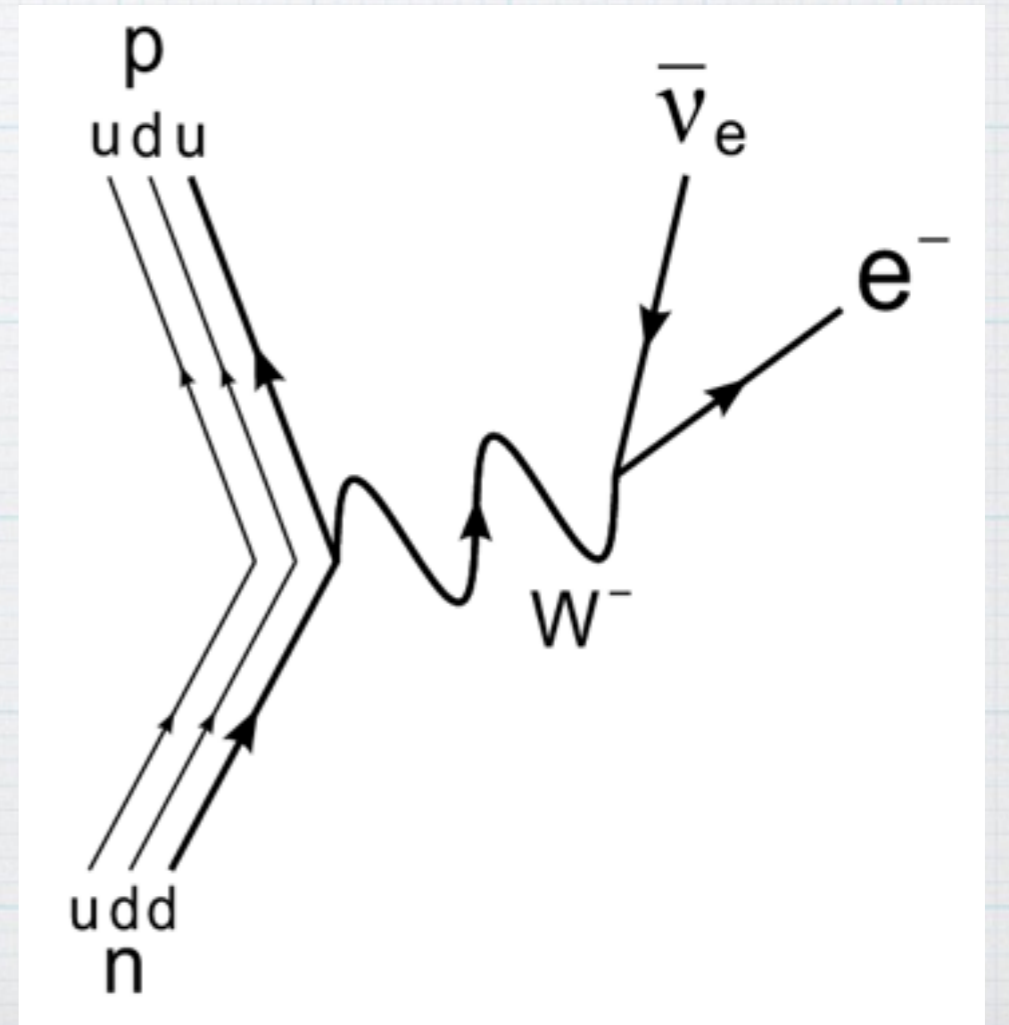
# Etkileşme örnekleri





# Zayıf Etkileşim

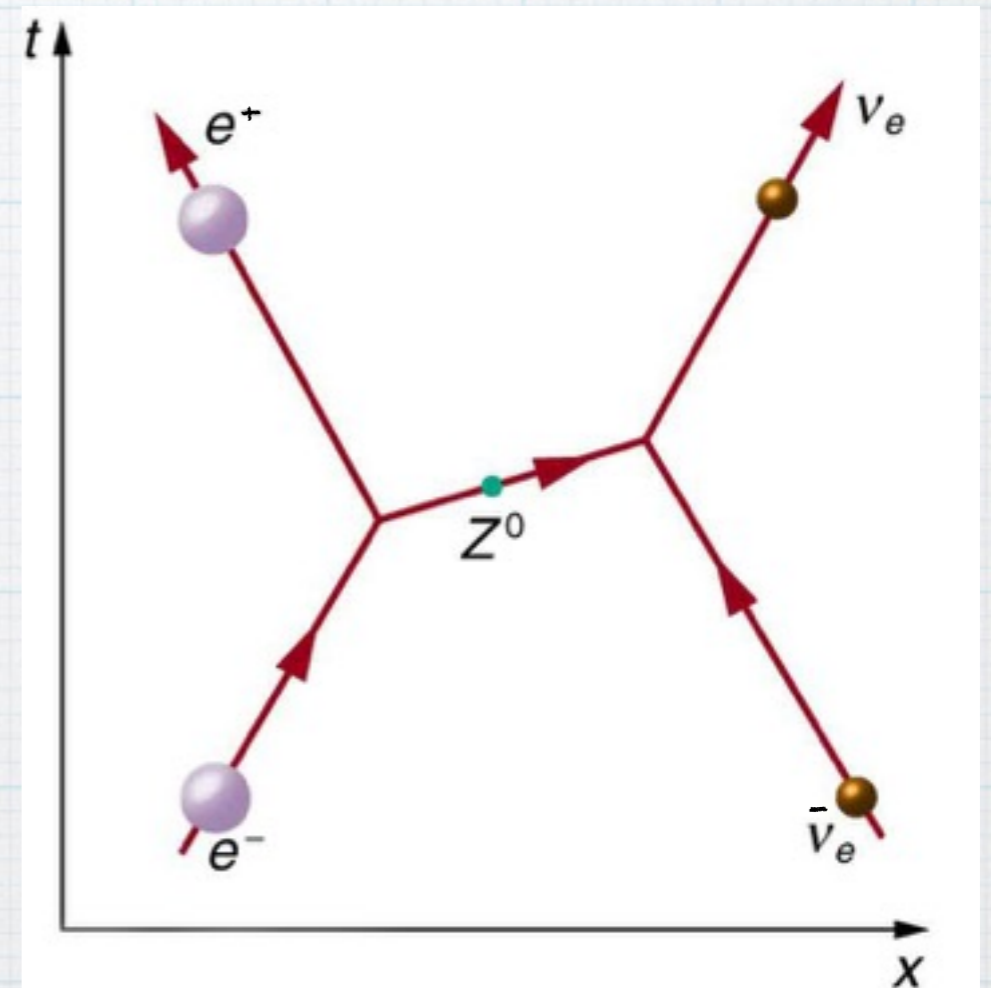
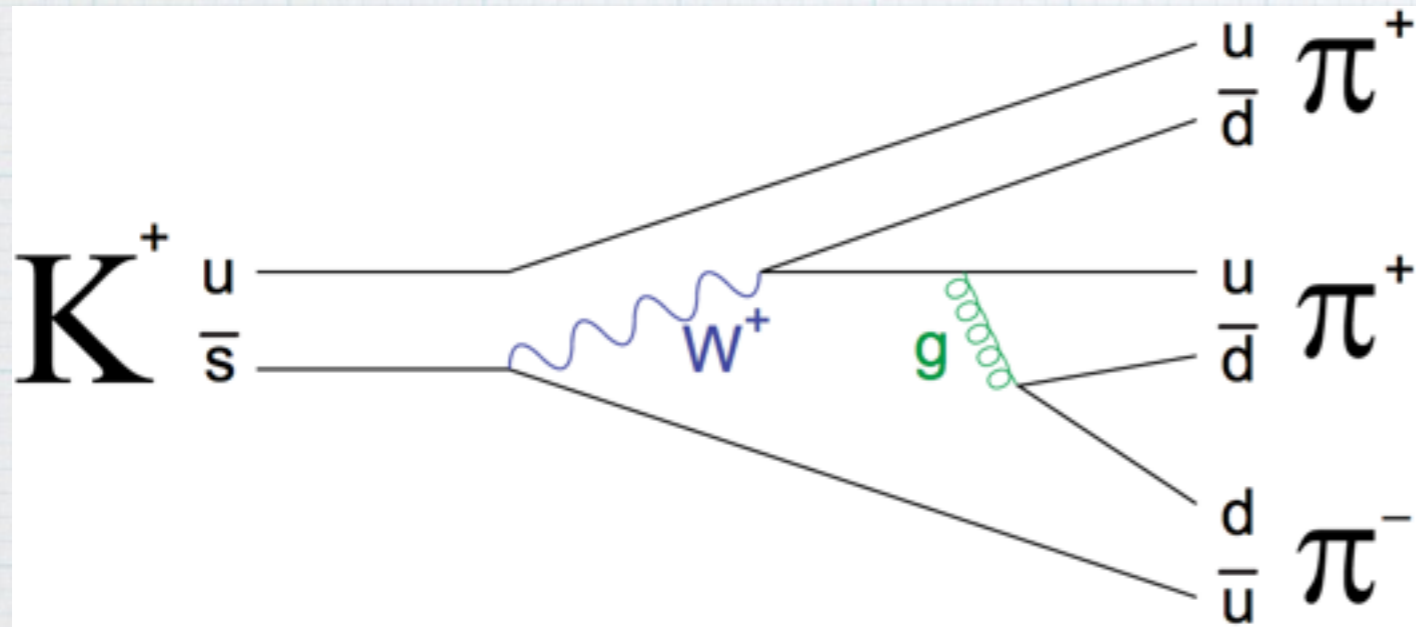
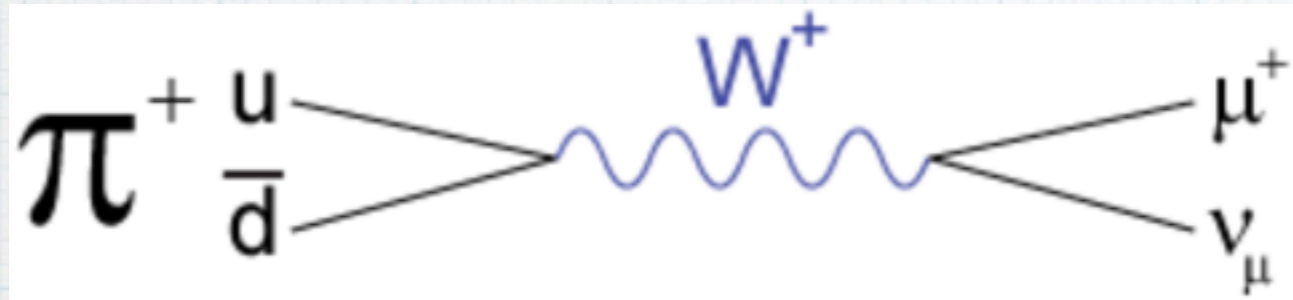
- Kuarkların çeşnilerini KÇD ile değişir
- Etkileşim kısa-menzillidir ( $10^{-18}$  m)
- Taşıyıcı parçacıkları kütle sahibidir
  - $M_z = 90 \text{ GeV}/c$
  - $M_w = 81 \text{ GeV}/c$ 
    - demir atomundan ağır





# Kuantum Çeşni Dinamiği

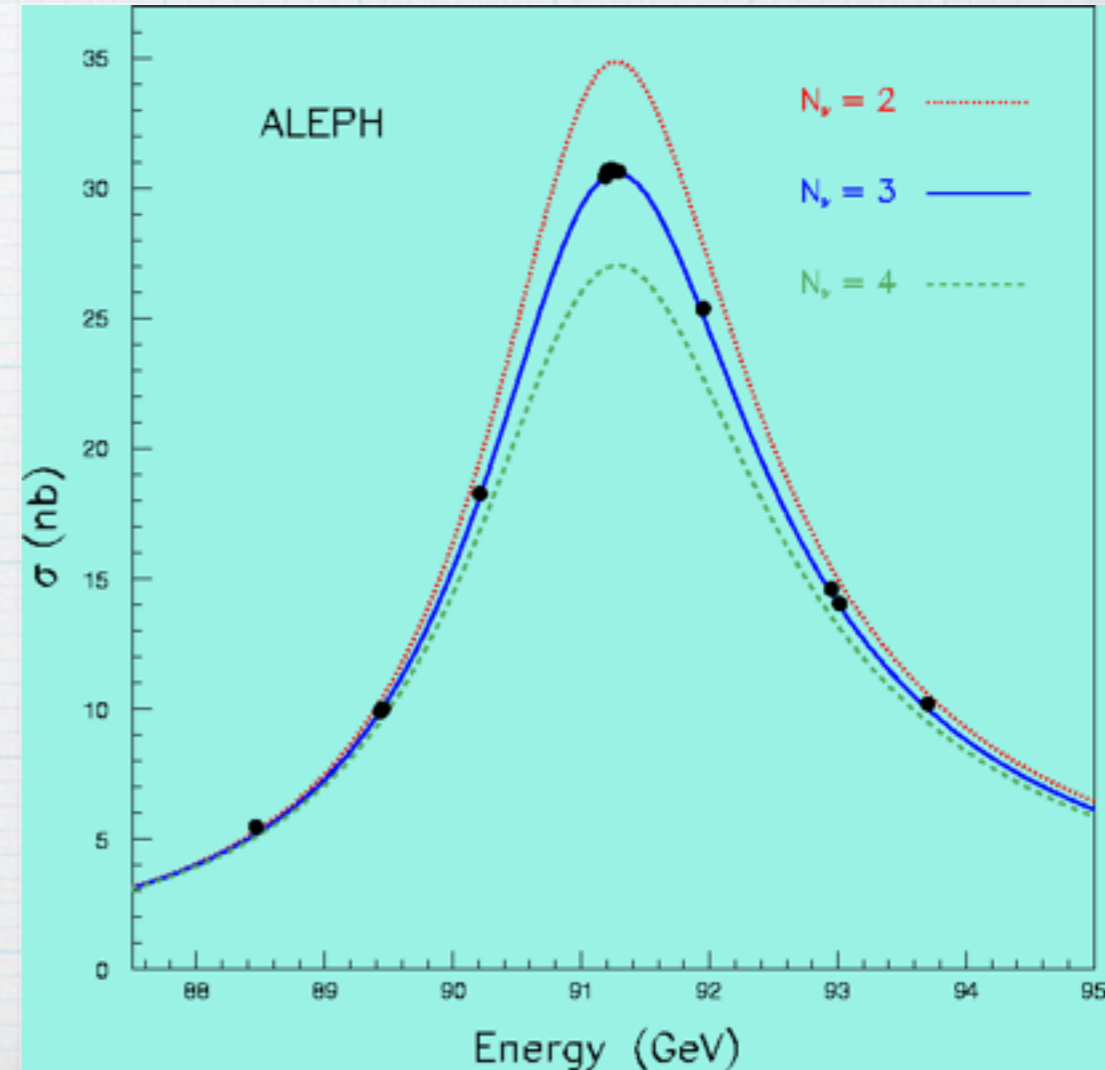
## örnekler





# W Z hakkında

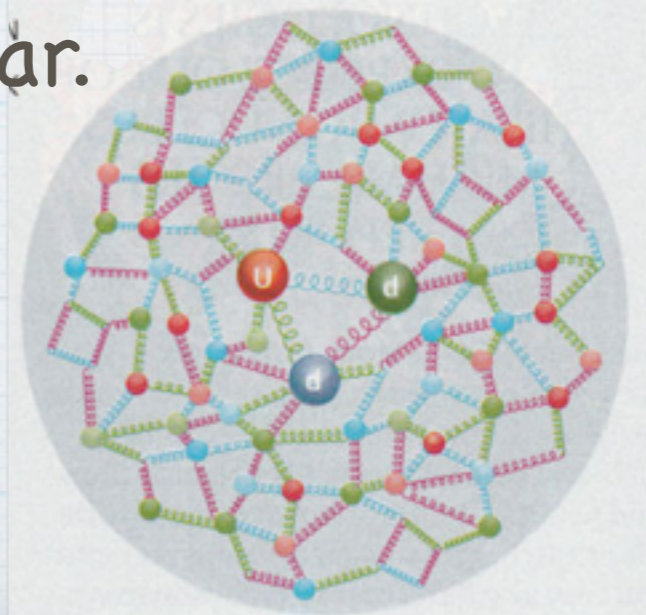
- \* UA1 ve UA2 takımlarınca CERN'de 1983 yılında keşfedildiler
- \* 1968 yılında Glashow, Weinberg, Salam tarafından önerilmişlerdi
- \* SLAC (ABD) / LEP1 ve LEP2 ayrıntılı olarak incelendiler
- \* W- W+ birbirinin karşı parçacığı, Z ise kendi kendinin dönü 1: yani 3 polarizasyon yönleri var.
- \* yarı ömürleri yaklaşık  $3 \times 10^{-25} s$
- \* W %11 olasılıkla elektron ve elektron nötrinosuna bozunuyor
- \* Z %20 olasılıkla nötrino - antinötrino çiftine bozunuyor
- \* LEP1 deki çalışmalar sayesinde hafif nötrinosu olan 3 aile olduğunu biliyoruz.





# Kuantum Renk Dinamiği

- \* Hadronların kendi içlerinde ve birbirleriyle olan etkileşimini açıklar
- \* Renk yükü taşıyan parçacıklar arasındaki bu etkileşim gluonlar tarafından yayılır
  - \* Renk yükü: **kırmızı**, **yeşil**, **mavi**
- \* etkileşim kısa-menzillidir ( $10^{-15}$  m): çekirdeğin içi
  - \* renkli parçacıklar tek başına bulunamazlar.
  - \* protonun içi bir KRD denizidir.





# gluonlar hakkında

- \* 1962 yılında Gell-Mann tarafından kurgulanmış ve 1978 yılında Alman elektron eşzamanlayıcısında (DESY) keşfedilmiştir.
- \* Gluon kütlelessiz bir parçacıktır.
- \* Yük?
  - \* KED'in taşıyıcısı foton elektrik yükü taşımaz
  - \* KRD'nin taşıyıcısı gluon renk yükü taşır



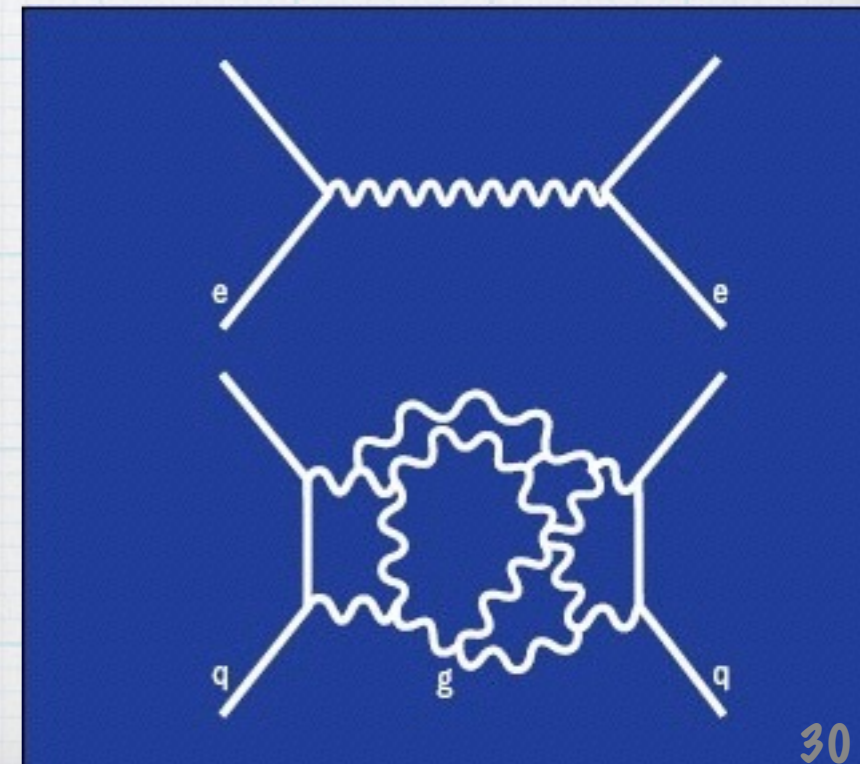
\* 8 çeşidi vardır:

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

$(r\bar{b} + b\bar{r})/\sqrt{2}$	$-i(r\bar{b} - b\bar{r})/\sqrt{2}$
$(r\bar{g} + g\bar{r})/\sqrt{2}$	$-i(r\bar{g} - g\bar{r})/\sqrt{2}$
$(b\bar{g} + g\bar{b})/\sqrt{2}$	$-i(b\bar{g} - g\bar{b})/\sqrt{2}$
$(r\bar{r} - b\bar{b})/\sqrt{2}$	$(r\bar{r} + b\bar{b} - 2g\bar{g})/\sqrt{6}.$

- \* Sadece gluonlardan oluşan bir parçacık var olabilir ama henüz bulunmamıştır.

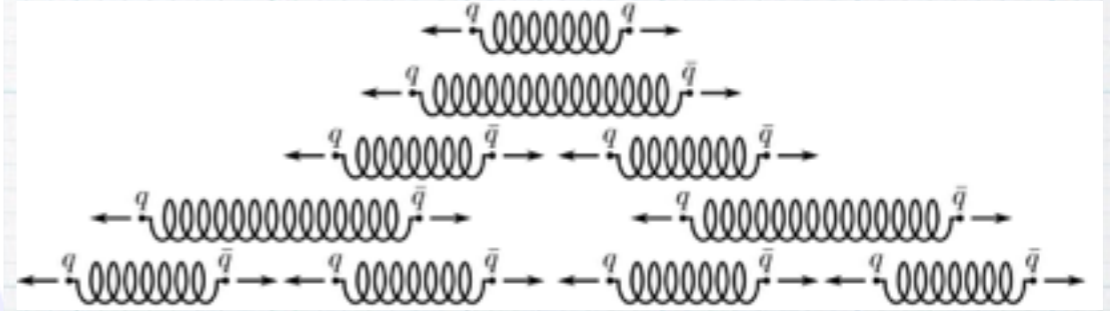
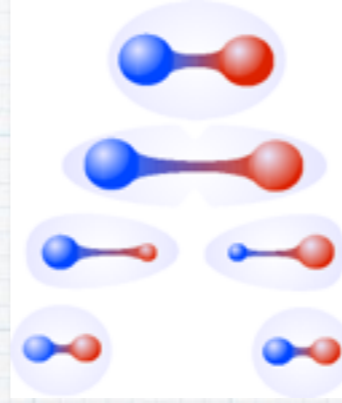
Gluonlar kendileri ile de etkileşir



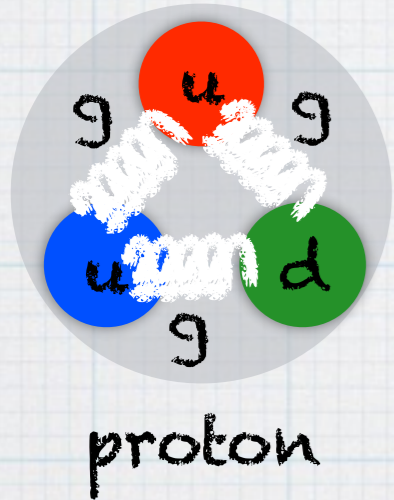


# Kuantum Renk Dinamiği

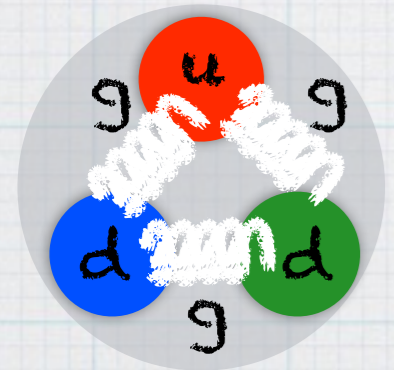
Renk hapsi



Koparma enerjisi kütleye dönüşür



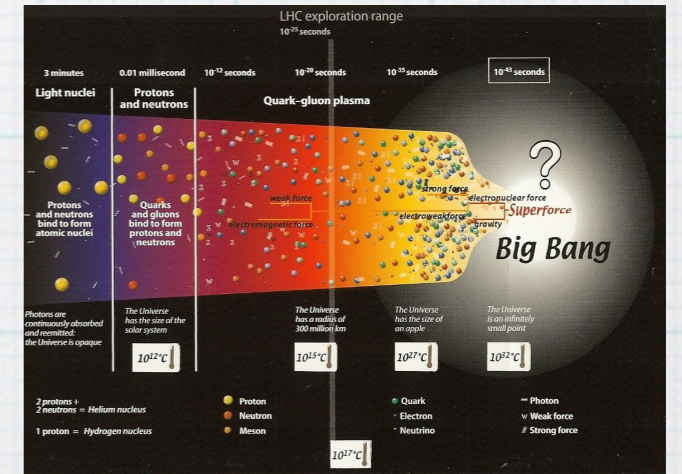
proton



nötron

Kavuşulmaz özgürlük  
Asymptotic freedom

yüksek enerjiyle çekirdeğin içine bakılıp quarklara yaklaştıkça bunlar bağlı değil, serbest gibi davranır.

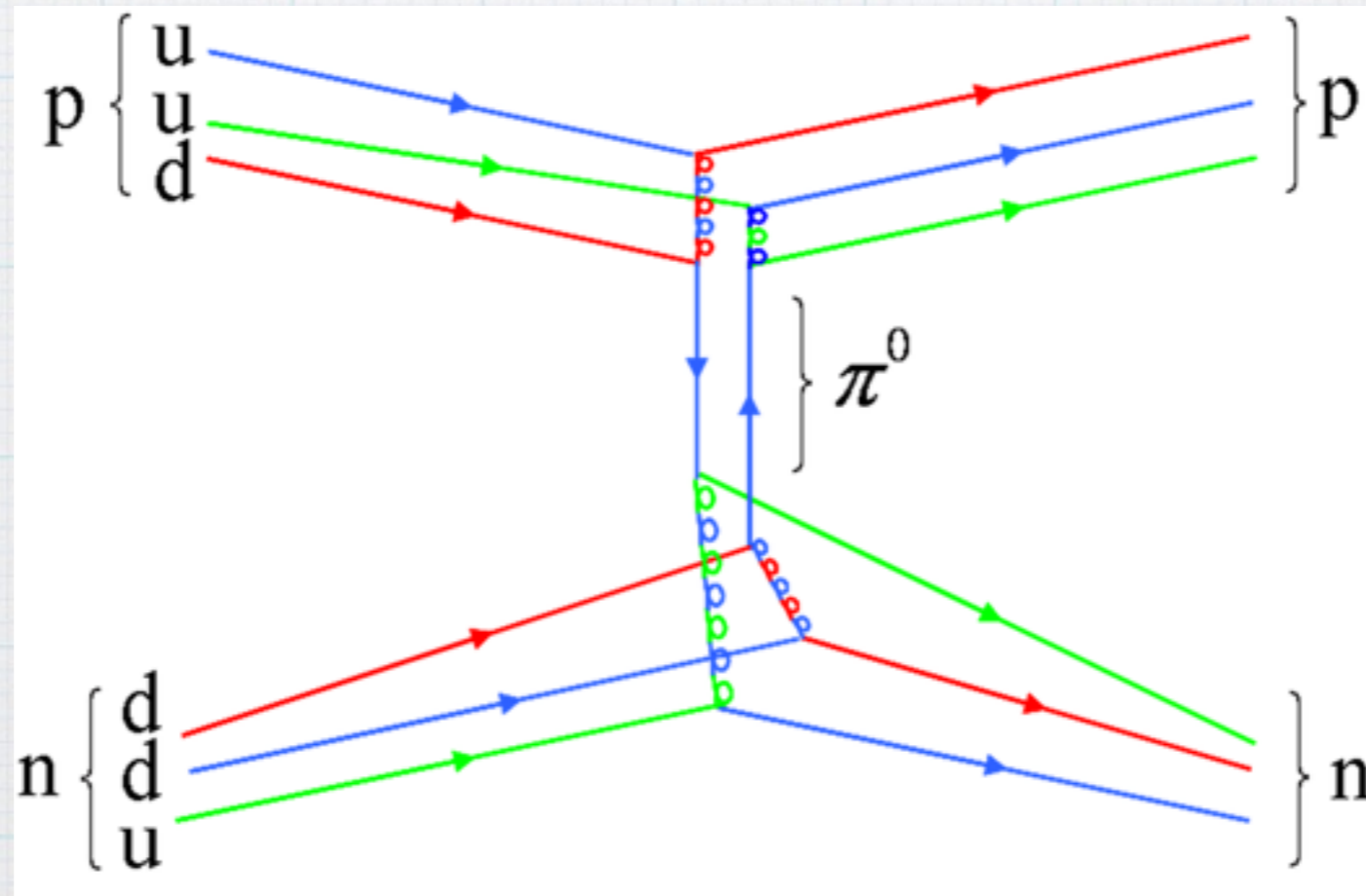
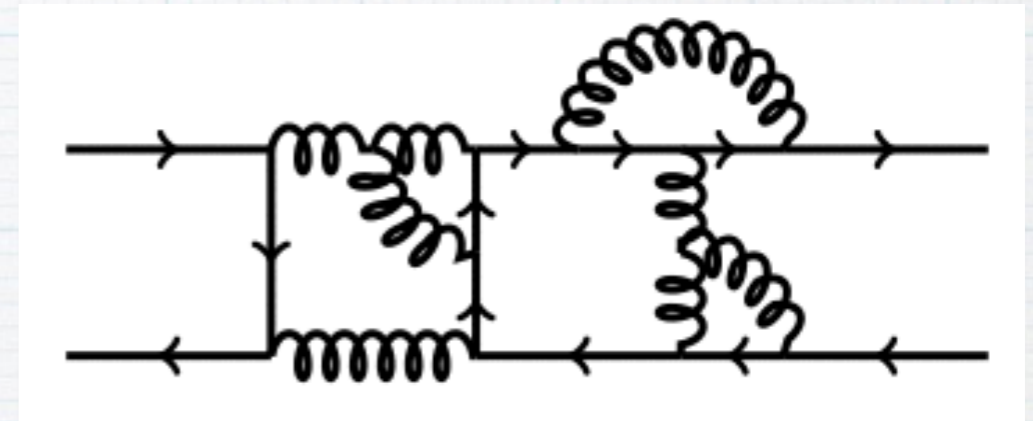
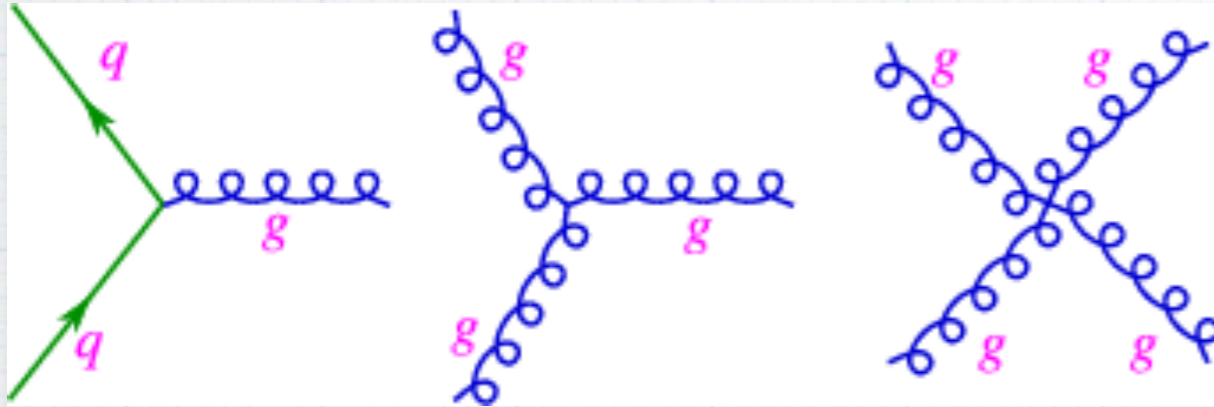


kurgulanması 1974 → Nobel 2004



# Kuantum Renk Dinamiği

## örnekler



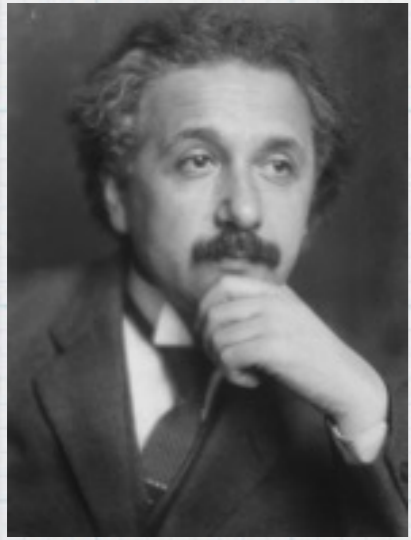
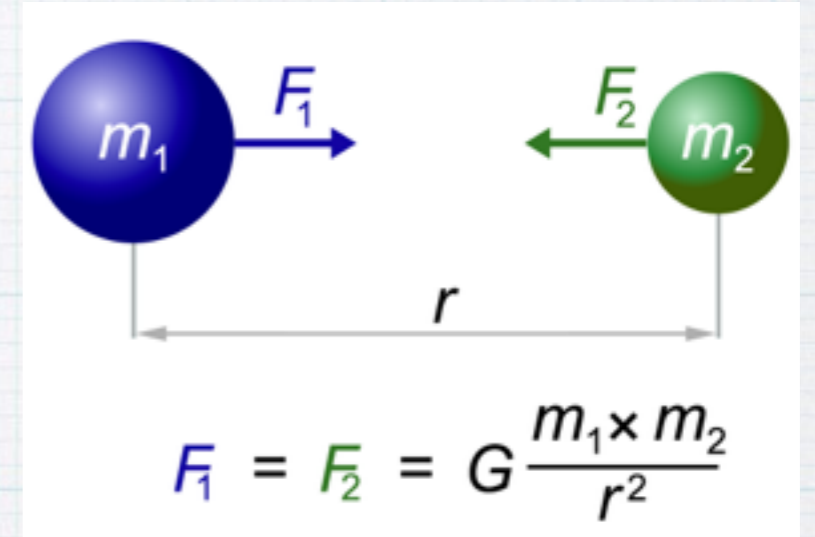


# Kütle çekimi



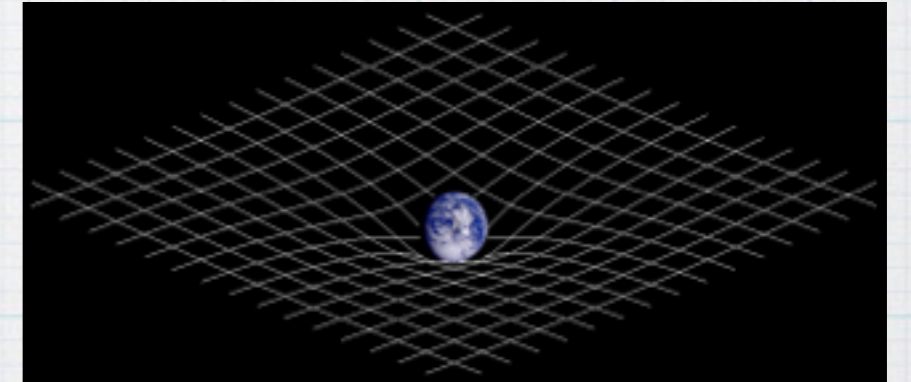
Isaac Newton

Klasik Mekanik



Albert Einstein

Özel Görelilik  
Genel Görelilik



$$G_{\mu\nu} + g_{\mu\nu} \Lambda = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

Uzayın Eğrilik metriği

Enerji Tensörü



# Graviton?

- Kuramsal bir parçacık
- Madde ile etkileşim tesir kesiti çok küçük
  - gözlemlenmesi çok zor
  - LIGO, VIRGO – Kütle çekimi dalgaları arayan deneyler
- Eğer varsa,
  - Kütlesiz olmalı – Kütle çekiminin etkisi sonsuz
  - Dönüsü 2 olmalı –  $T_{\mu\nu}$  Stres-Energy tensörü ikinci dereceden



# ek: kuantum alan ve parçacık

## \* Klasik anlamda alan: $T(x,y,z,t)$

- \* uzay zamanda her noktaya bir değer vermek
- \* Sıcaklık haritası  $\rightarrow$  Sayıl (scalar) alan
- \* Rüzgar haritası  $\rightarrow$  Yönel (vector) alan

## \* Kuantum alanı: $\psi(x,y,z,t)$

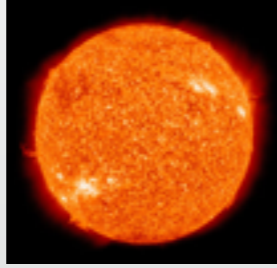
- \* K. alanların karesi olasılık yoğunluk işlevi (probability density function):  $\psi^*\psi$
- \* Klasik alanı KM özellikleri ekleyelim
  - \* ölçüm sırası önemli olsun (değişme bağlantısı - commutation relation)
  - \* enerji, açısal momentum sürekli değil kesikli olsun (kuantum) ve bir zemin enerji değeri olsun.
- \* Kuantum alanların ortalama değerleri klasik sonuçları versin

## \* Parçacıklar ne?

- \* Kesikli alanların enerji verilip uyarılmış halleri  $|\psi\rangle$ 
  - \* alan<sup>2</sup> - çocuğun yaramazlık ihtimali, enerji - şeker, parçacık - yaramaz çocuk
- \* EM K. alan  $\rightarrow$  foton, Elektron K. alanı  $\rightarrow$  elektron



# Standart Model



$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} + i\bar{\Psi}\not{D}\Psi + h.c. + \bar{\Psi}_i \gamma_{ij} \Psi_j \phi + h.c. + \frac{1}{2} D_\mu \phi^2 - V(\phi)$$

- Elektrozayıf + Kuvvetli etkileşim

→ ikisi aynı parçacıklar üzerine farklı etki ediyorlar.

- Evren tarifi:

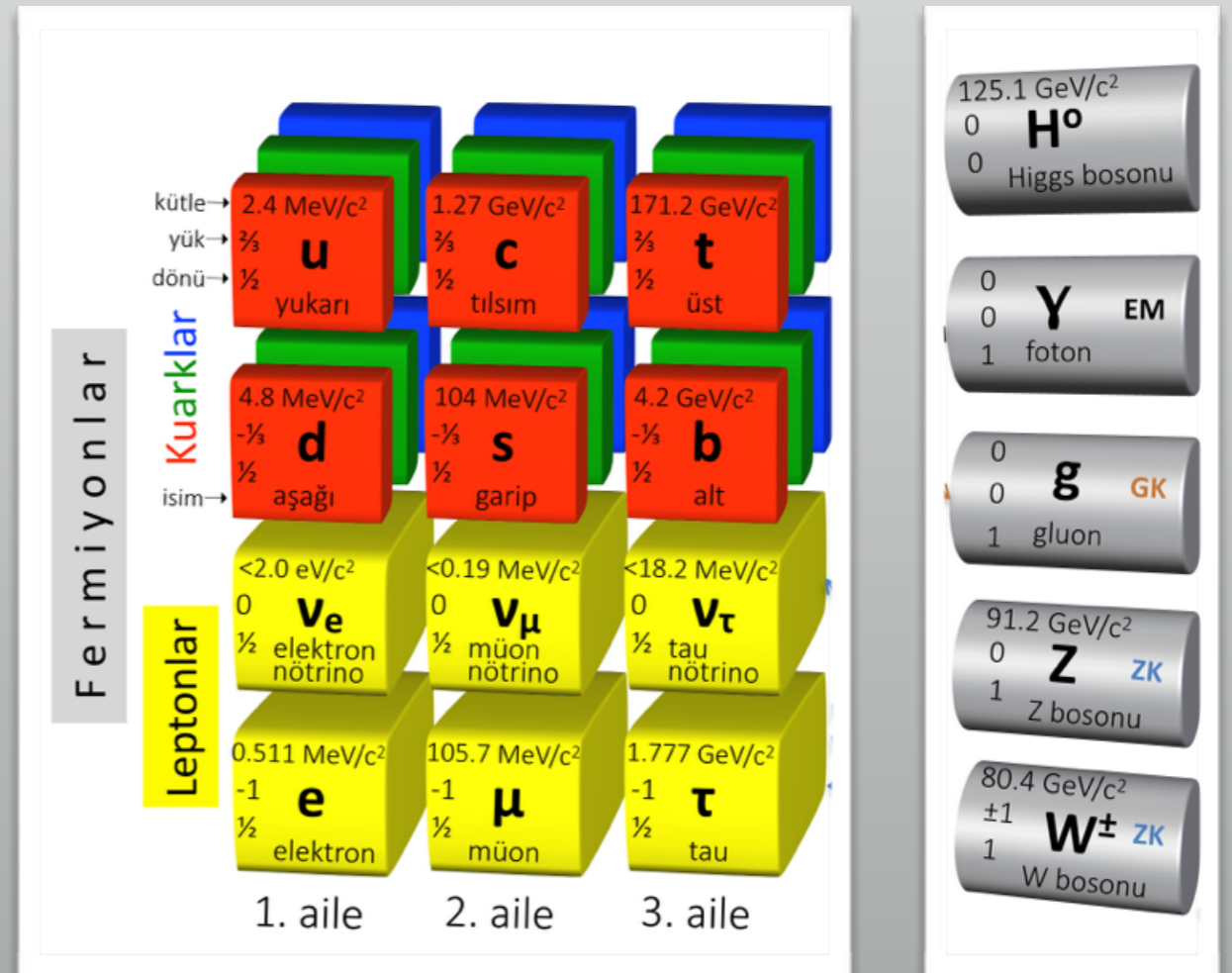
→ Çekirdekler, atomlar fermiyonları uygun şekilde karıştırarak yapılırlar.

- ▶  $p \approx uud$   $n \approx udd$
- ▶ Hidrojen  $\approx p + e$ ,
- ▶ Helyum  $\approx n + n + p + p + e + e$

→ Fermiyonlar bozonlar sayesinde etkileşir.

- Sonuç:

→ SM & genel görecelik, yaşadığımız evreni açıklar. (hepsini değil)





# Standart Model: Saygın bir tarih

Standart model yüz yıllık emeğin sonunda ortaya çıktı.

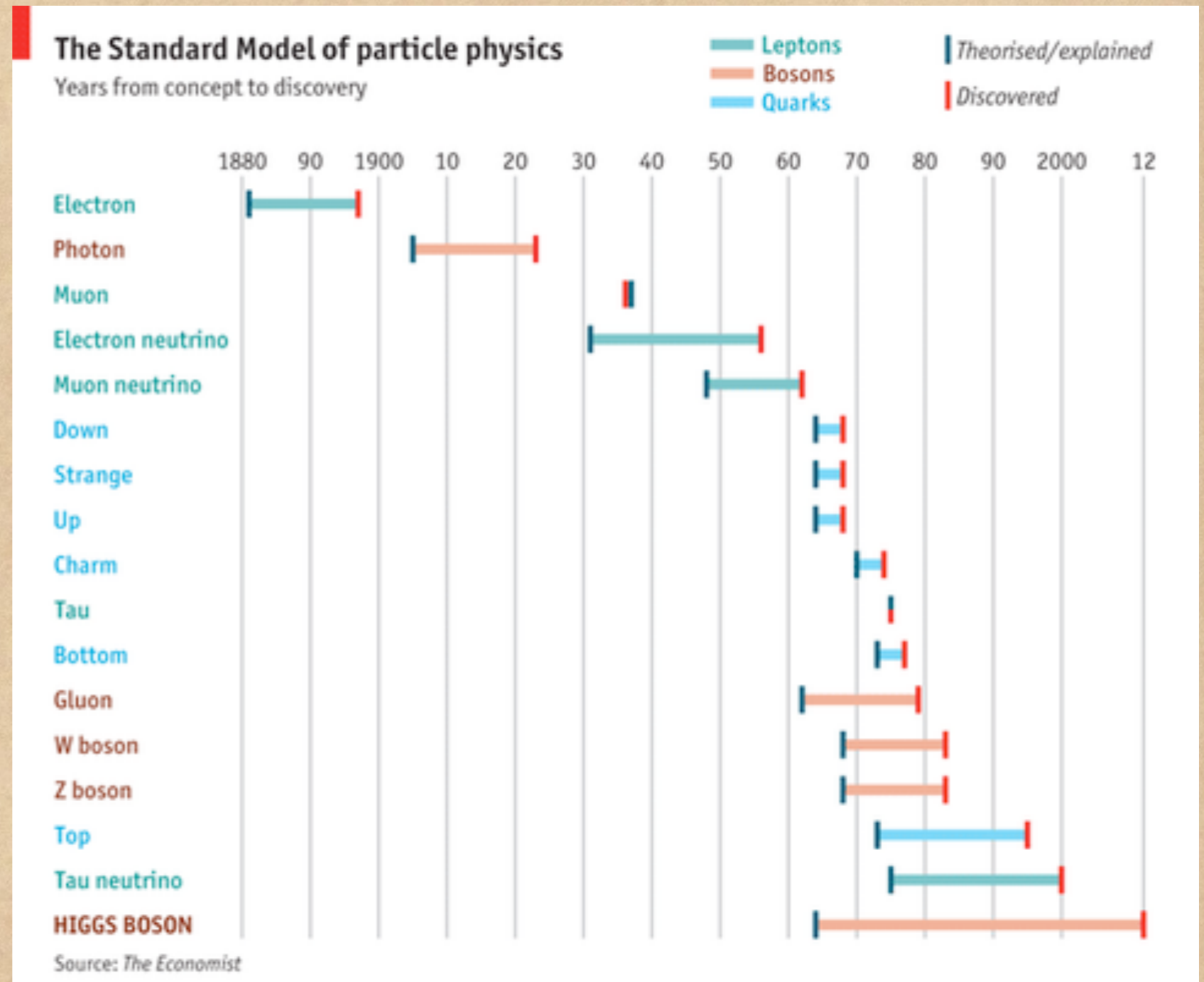
Oluşturulmasında **kuram ve deney iç içe** yer aldı.

SM kuramsal olarak tutarlıdır, ve deney/gözlem ile doğrulanmıştır.

SM keşfi bilimsel yöntemin işleyişine iyi bir örnektir.

Bilimsel yöntem:

- deney/gözlem sonuçlarını açıklayan bir varsayım üret,
- varsayımı farklı deneylerle sına,
- doğru, ya da yanlışsa yenisini üret.



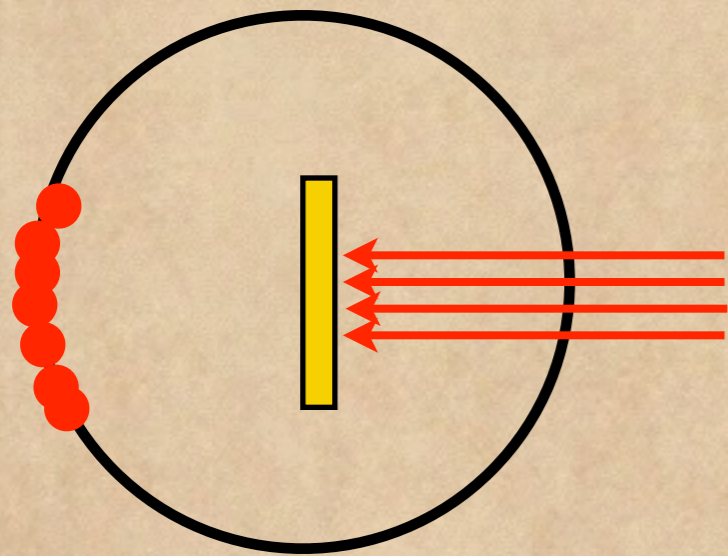
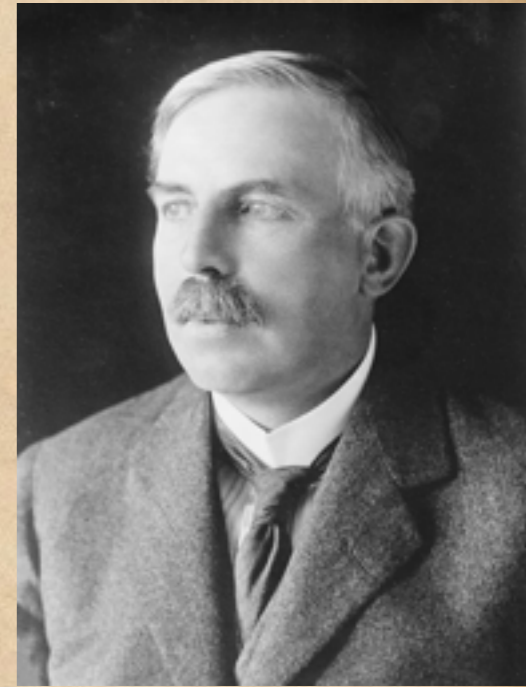


# SM geçmişinden: Çekirdeğin keşfi

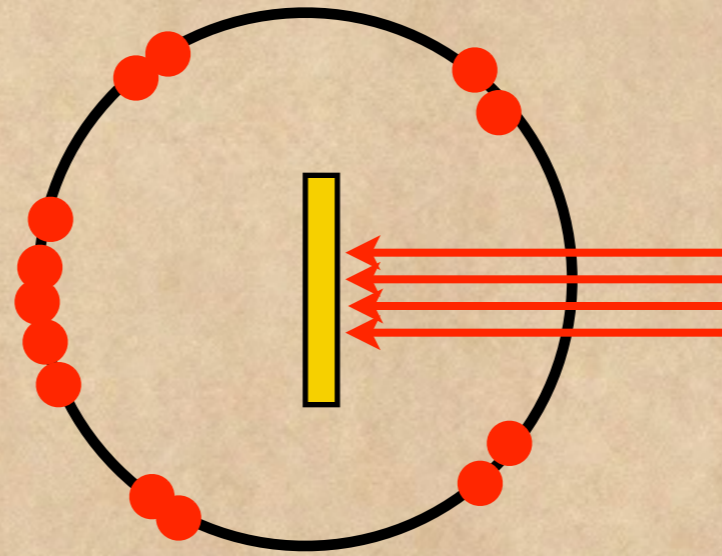
*beklenenden farklı olan*

Sene 1904...elektron keşfi Thompson atomun içinde artı ve eksi yüklerin eşit dağılımla yüzdüğünü öneriyordu.

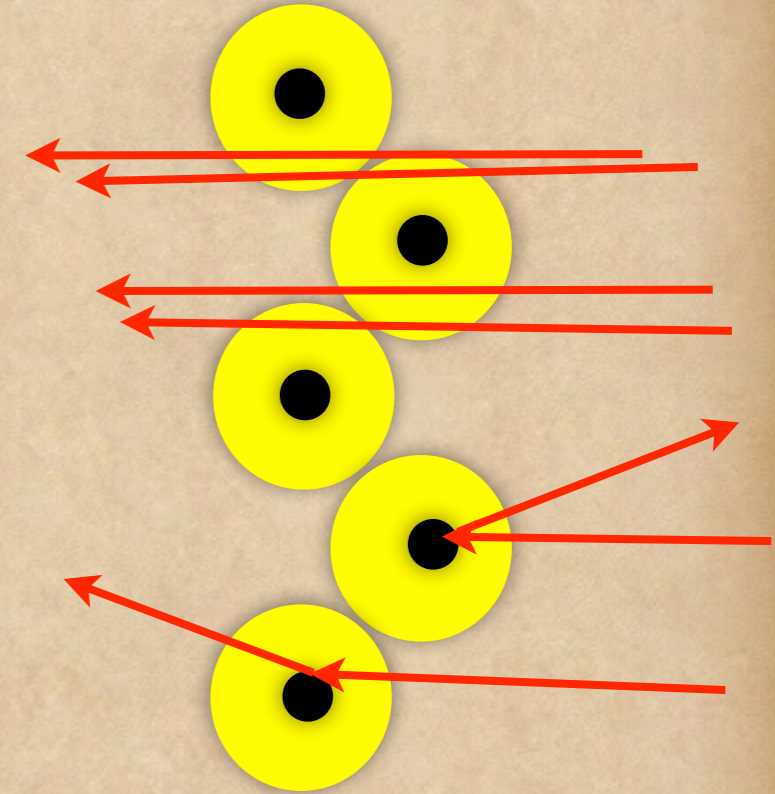
Rutherford, Geiger ve Marsden bu öneriyi sınamak için 1911'de altın folyolara  $He^+$  çekirdekleri ateşlediler. İlk kez mikroskopla görülmeyen parçacıkların içi araştırılıyordu.



beklenen



gözlenen



açıklama

Sonuç: Deneyin zaferi - merkezdeki yoğun çekirdek ve etrafta dönen elektronlar ile açıklanan Rutherford-Bohr atomu.



# SM geçmişinden: Muon keşfi

*beklenmeden gelen*

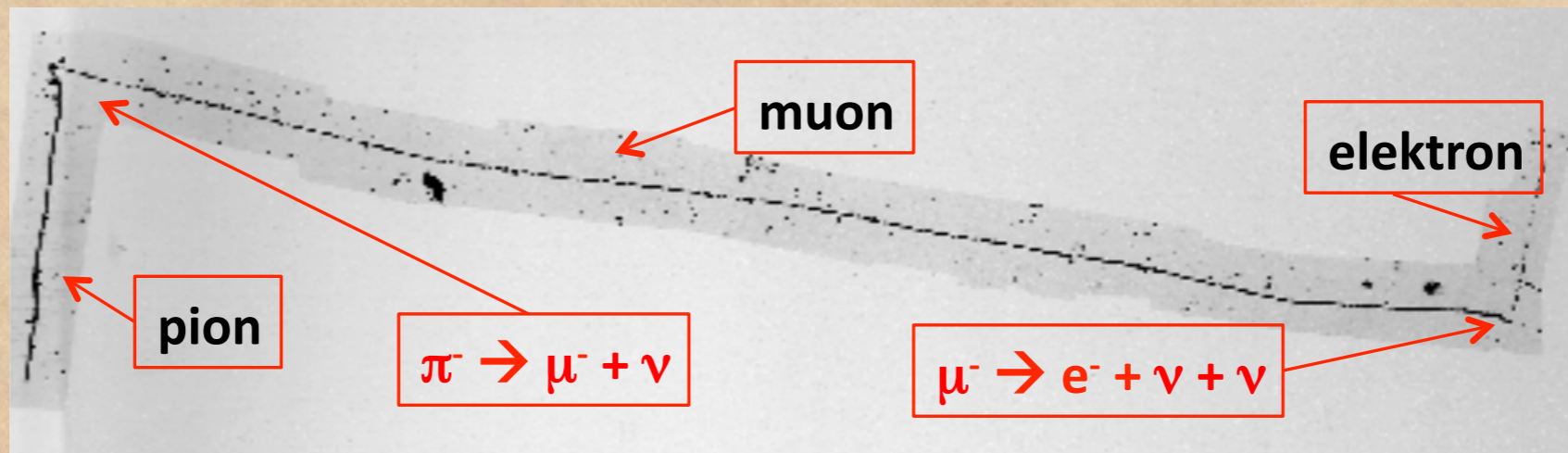
Sene 1936...Anderson ve Neddermayer bulut odasında kozmik ışınları incelerken eksi yüklü, ama manyetik alanda elektrondan daha az, protondan daha fazla bükülen bir parçacık gözlediler.

Elektrondan ağır protondan hafif bu yeni parçacığın ne olduğunu başta kimse bilemedi. Adına mu mezon dendi.

O sırada benzer kütlede olan pi mezonlar gözlemlendi - pi'leri diğerkileri takip etti. Fakat hızlandırıcı ve kozmik ışınlar pi ve sonrakilerin her türlü etkileştiğini görürken mu'lerin güçlü etkileşmediğini gördü.

İçe anlam veremeyen Isidor Rabi "*Bunu kim ismarladı ki?!*" dedi.

Sonunda muon'un elektronun ağır kuzeni olduğu anlaşıldı.





# SM geçmişinden: Top kuark keşfi

## *beklenip de gelen*

1973te Kobayashi ve Maskawa 3. aileyi önermiş, 1977de b quark keşfedilmişti. b kuark ile eş olacak top kuarkın varolması gerektiği düşünülüyordu.

1980lar... Top kuarkın özellikleri hesaplanabiliyor, ama kütlesi bilinmiyordu. SLAC, DESY ve CERNdeki hızlandırıcıların top kuark yapmaya enerjileri yetmedi. Top daha ağır olmalıydı.

Top kuark sonunda 1995te Fermilab Tevatron'da D0 ve CDF deneylerince 176 GeV kütlede gözlemlendi.

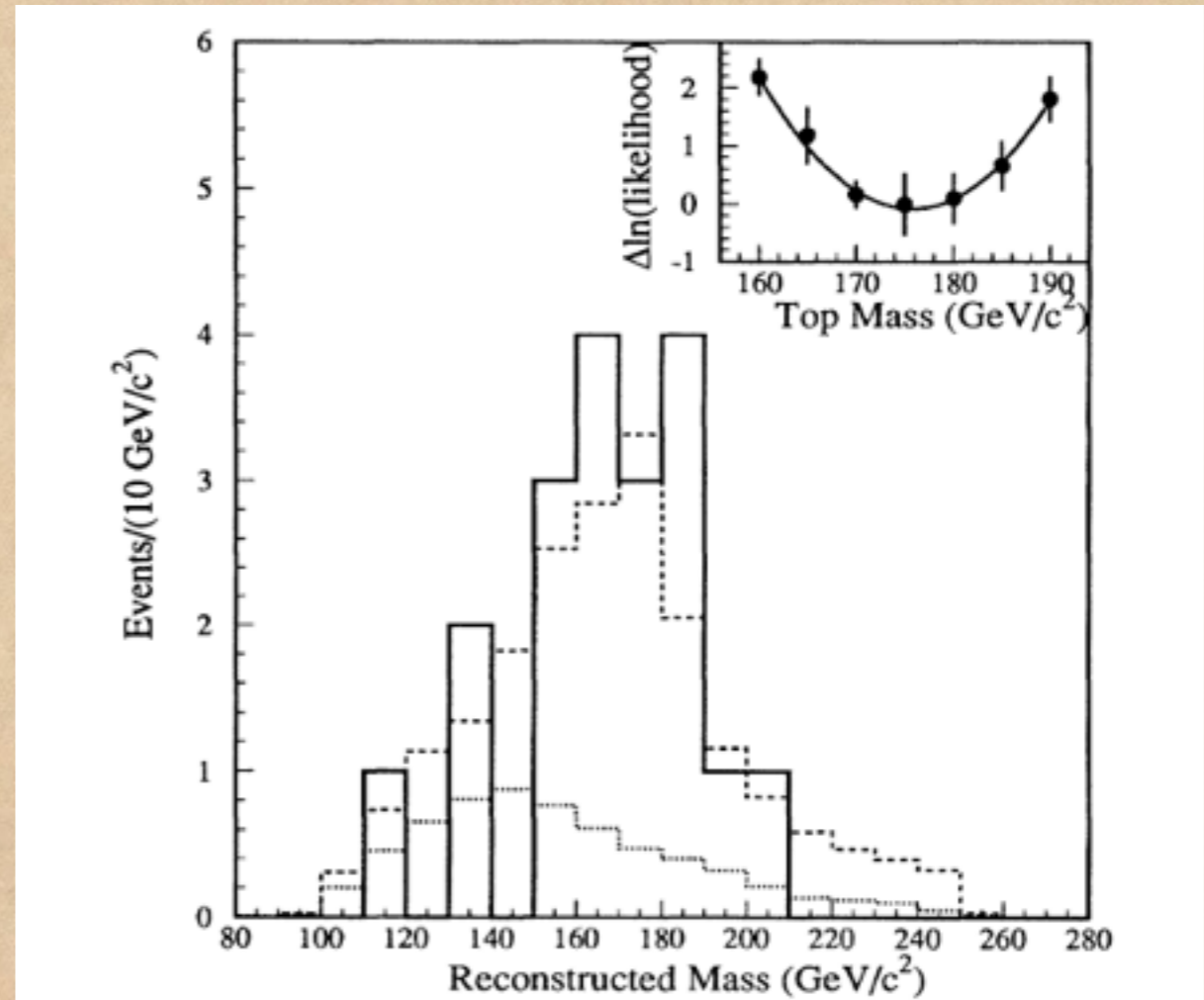


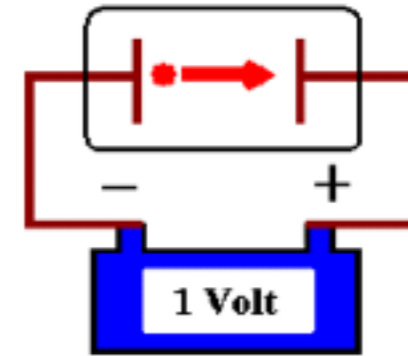
FIG. 3. Reconstructed mass distribution for the  $b$ -tagged  $W + \geq 4$ -jet events (solid). Also shown are the background shape (dotted) and the sum of background plus  $t\bar{t}$  Monte Carlo simulations for  $M_{\text{top}} = 175 \text{ GeV}/c^2$  (dashed), with the background constrained to the calculated value,  $6.9^{+2.5}_{-1.9}$  events. The inset shows the likelihood fit used to determine the top mass.



# PF birimleri

- Enerji – elektron volt (eV)

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



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

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

- Yani yürürken kinetik enerjimiz:

$$20 \text{ J} = 1.25 \times 10^{20} \text{ eV}$$

$$= 1.25 \times 10^8 \text{ TeV}$$



- *Enerji*: GeV
- *Zaman*:  $(\text{GeV}/\hbar)^{-1}$
- *Momentum*: GeV/c
- *Uzunluk*:  $(\text{GeV}/\hbar c)^{-1}$

- *Kütle*:  $\text{GeV}/c^2$
- *Alan*:  $(\text{GeV}/\hbar c)^{-2}$
- $\hbar=c=1$  alsak herşey ne basit olur!

- Böylece, bütün fiziksel nicelikler GeV'in kuvvetleri cinsinden ifade edilir.
- S.I. birimlerine geri dönüştürme için,  $\hbar$  and  $c$  nin gerekli çarpanları kullanılır.

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

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

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

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



# Ödev:

QUARKS

mass →	$\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$	$1.275 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.07 \text{ GeV}/c^2$
charge →	$2/3$	$2/3$	$2/3$
spin →	$1/2$	$1/2$	$1/2$
	<b>u</b>	<b>c</b>	<b>t</b>
	up	charm	top
	$\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 95 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$
	$-1/3$	$1/3$	$-1/3$
	$1/2$	$1/2$	$1/2$
	<b>d</b>	<b>s</b>	<b>b</b>
	down	strange	bottom

İşaretli kuarklar diğerlerine göre daha ağır. 1. ailede durum 2. ve 3.ye göre farklı - yani simetri kırılmış.

Eğer simetri korunmuş olsaydı, yani up kuark down kuarktan daha ağır olsaydı bu nelere yol açardı?