

# Parçacık Fiziđine Giriş

*Doç. Dr. Aysuhan OZANSOY*

*Ankara Üniversitesi Fizik Bölümü  
aozansoy@science.ankara.edu.tr*

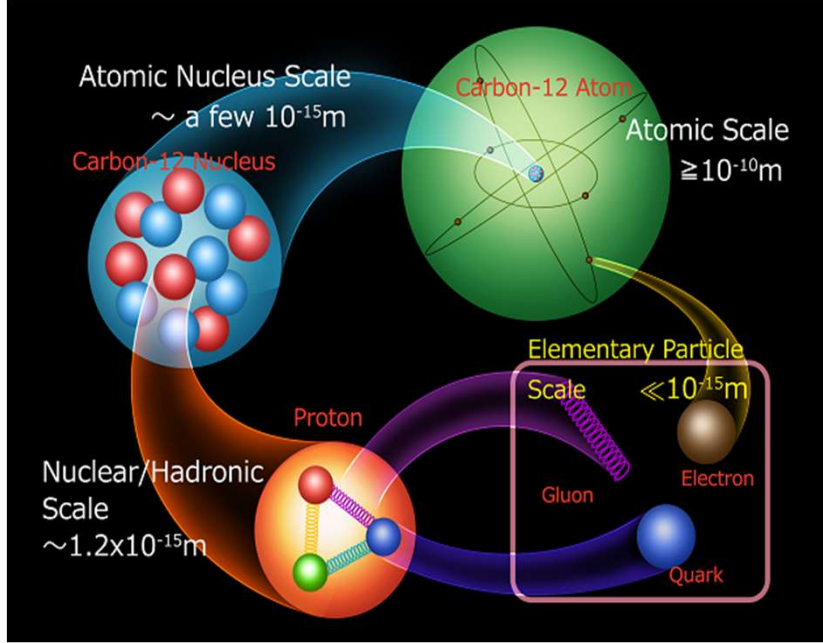
## İÇERİK

1. Parçacık Fiziği nedir?
  2. Doğal Birim Sistemi
  3. Temel Etkileşmeler
  4. Korunum Yasaları
  5. Kuantum Elektrodinamiği (KED)
  6. Feynman Diyagramları
  7. Kuantum Renk Dinamiği (KRD)
  8. Zayıf etkileşmeler
  9. Higgs Bozonu
  10. Simetriler
- Özet

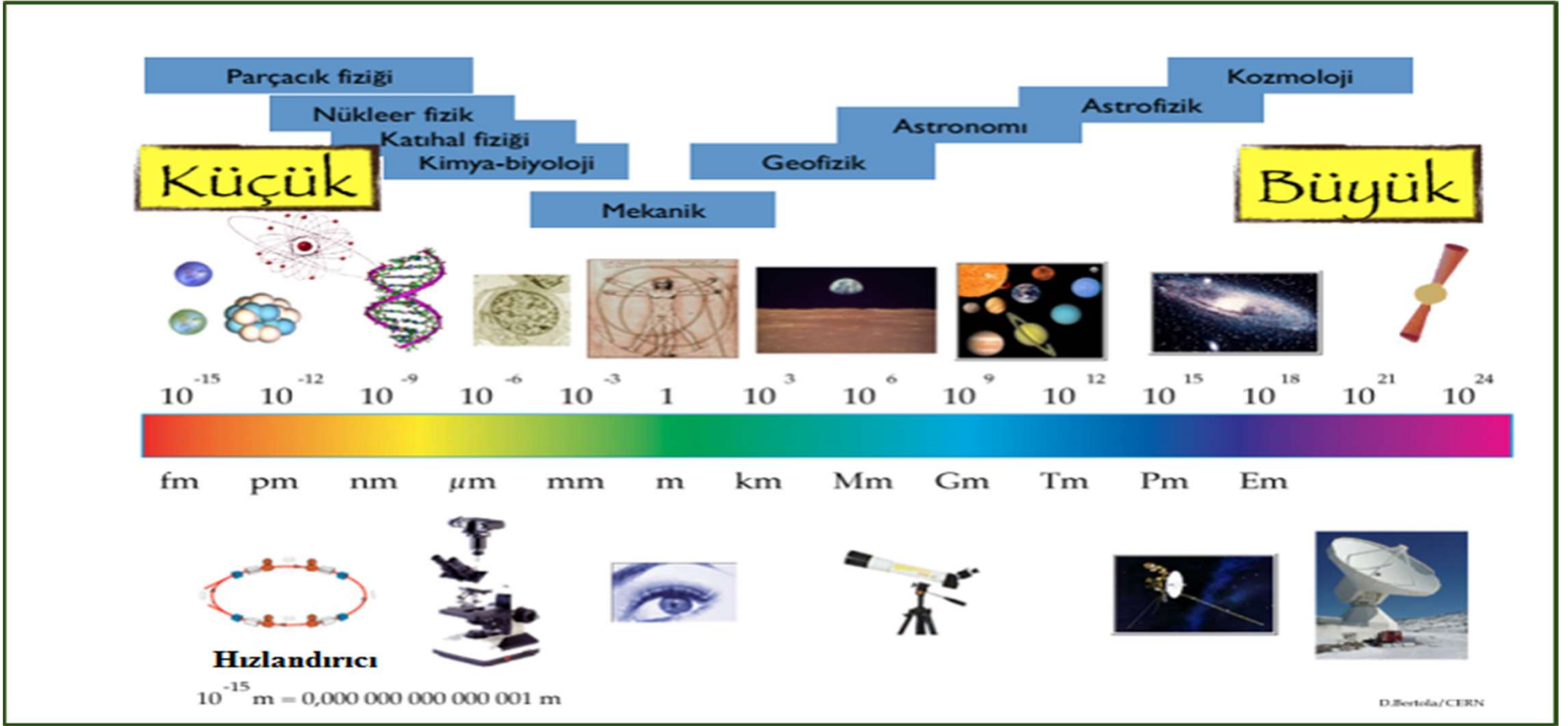
Kütle→ Yük→ Spin→	2.4 MeV $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ <b>u</b> yukarı	1.27 GeV $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ <b>c</b> tılsım	171.2 GeV $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ <b>t</b> üst	0 0 1 <b><math>\gamma</math></b> foton
<b>Kuarklar</b>	4.8 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ <b>d</b> aşağı	104 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ <b>s</b> acayıp	4.2 GeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ <b>b</b> alt	0 0 1 <b>g</b> gluon
<b>Leptonlar</b>	<2.2 eV 0 $\frac{1}{2}$ <b><math>\nu_e</math></b> elektron nötrino	<0.17 MeV 0 $\frac{1}{2}$ <b><math>\nu_\mu</math></b> müon nötrino	<15.5 MeV 0 $\frac{1}{2}$ <b><math>\nu_\tau</math></b> tau nötrino	91.2 GeV 0 1 <b>Z</b> Z bozon
	0.511 MeV -1 $\frac{1}{2}$ <b>e</b> elektron	105.7 MeV -1 $\frac{1}{2}$ <b><math>\mu</math></b> müon	1.777 GeV -1 $\frac{1}{2}$ <b><math>\tau</math></b> tau	80.4 GeV $\pm 1$ 1 <b>W<sup>±</sup></b> W bozon
				<b>Bozonlar (kuvveller)</b>

*Parçacık fiziği, yüzlerce yıllık Doğa kanunlarını anlama çabasının modern bir ismidir.  
(E. Witten)*

## 1. Parçacık Fiziği (Yüksek Enerji Fiziği) Nedir?



- Parçacık fiziği en temel düzeyde maddenin yapı taşlarının neler olduğunu ve bu temel yapı taşlarının birbirleri ile nasıl etkileştiklerini (temel etkileşimleri) anlamaya çalışır.
- Maddenin temel yapı taşlarını ve özelliklerini bilmek sadece küçük maddelerle ilgili değil, galaksilerin ve evrenin nasıl oluştuğu, onların nasıl geliştiği hakkında da bilgi verir.
- Parçacık fiziğinin Standart Modeli (SM), temel parçacıkları ve onlar arasındaki **güçlü, elektromanyetik ve zayıf etkileşimleri** açıklayan bir modeldir. (Kütle çekimi dahil değil! Mikroskopik seviyede kütleçekim kuvveti ihmal edilebilir ancak erken evren ve kozmoloji çalışmaları için kütleçekimi gereklidir)



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



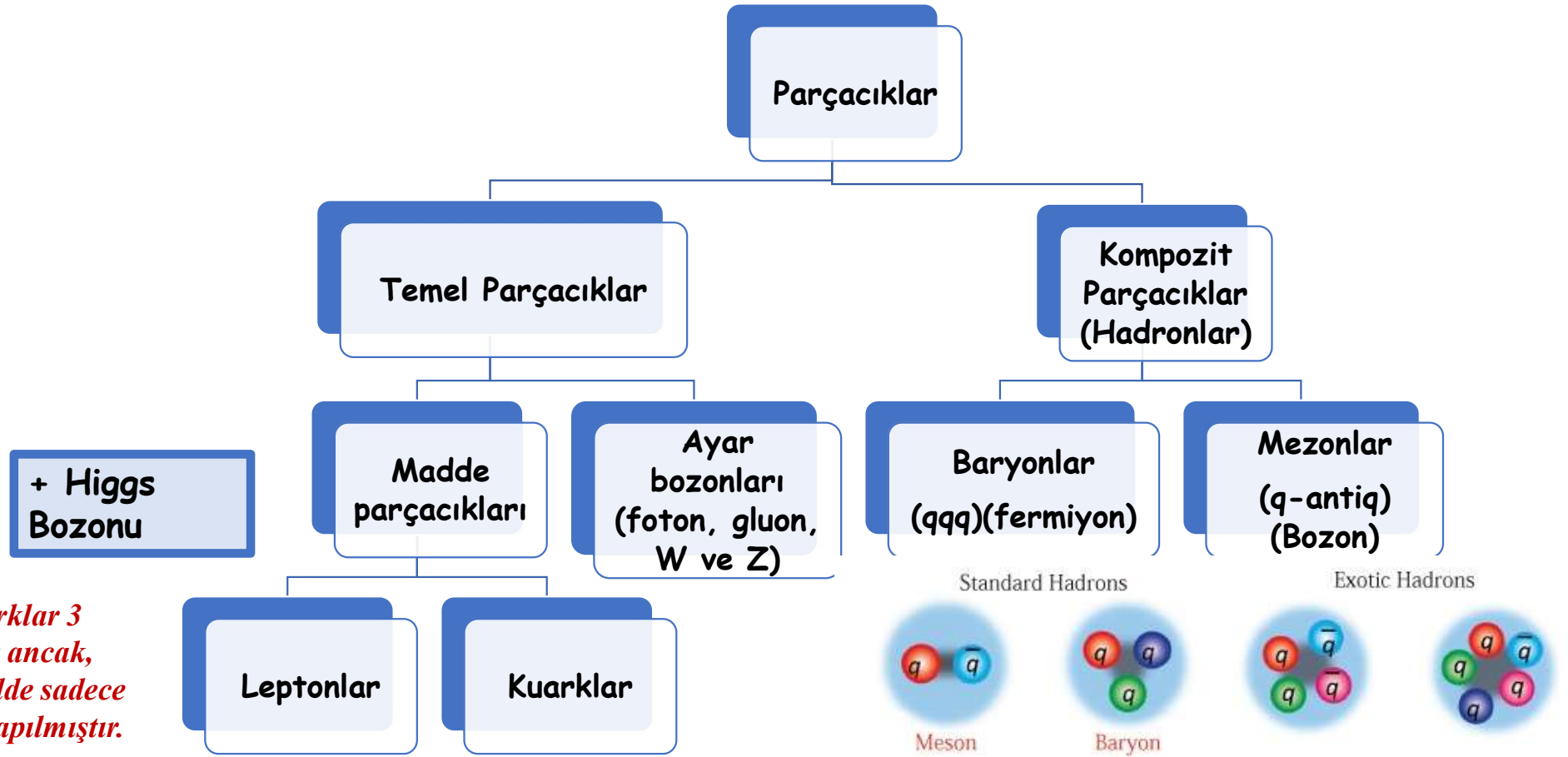
Newton Hareket Yasalarının geçerli olmadığı ışık hızına ( $c$ ' ye) yakın hızlardaki hareketi anlamak için "**Görelilik Teorisi**" ne ve atomik ölçekteki hareketi anlamak için de "**Kuantum Mekanik**" ne ihtiyaç vardır.

**Küçük boyutlar (atom ve atom altı ölçek)**

<b>Yüksek hızlar (<math>c</math>' ye yakın)</b>	<b>Klasik Mekanik</b> (Newton Formalizmi Lagrange Formalizmi Hamilton Formalizmi)	<b>Kuantum Mekanik</b> (Schrödinger, Heisenberg, Bohr ve diğerleri)
	<b>Görelilik Mekanik</b> (Einstein)	<b>Kuantum Alan Teorisi</b> (Dirac, Pauli, Schwinger, Feynman ve diğerleri)

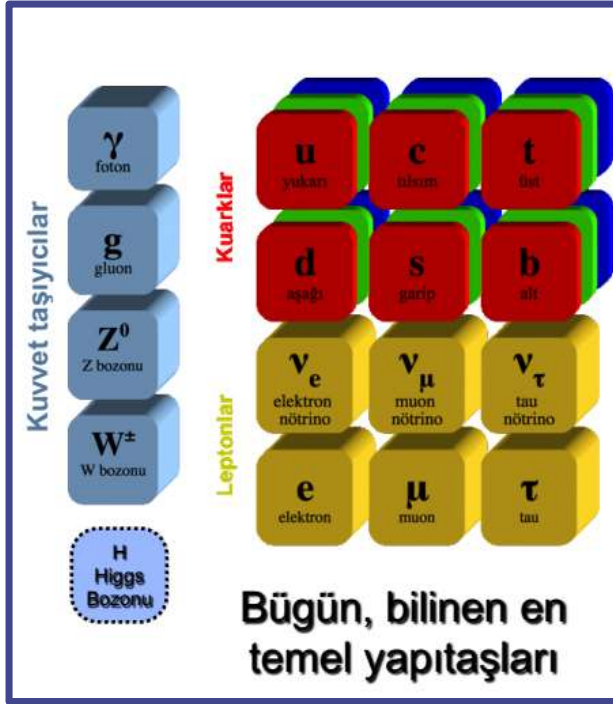
**Kuantum mekanik + Özel Görelilik Teorisi**

**Temel parçacık fiziği**, doğal olarak kuantum alan teorisinin bir konusudur. Atomaltı dünyadaki etkileşimleri anlatan bir teori olarak kuantum alan teorisinin başarısı, «Standart Model» olarak şekil bulmuştur. **SM**,  $SU(3)_c \times SU(2)_L \times U(1)_Y$  ayar grubu ile ifade edilen yerel (lokal) bir ayar teorisidir. Temel etkileşimler, yerel ayar değişmezliği ilkesinden elde edilir.



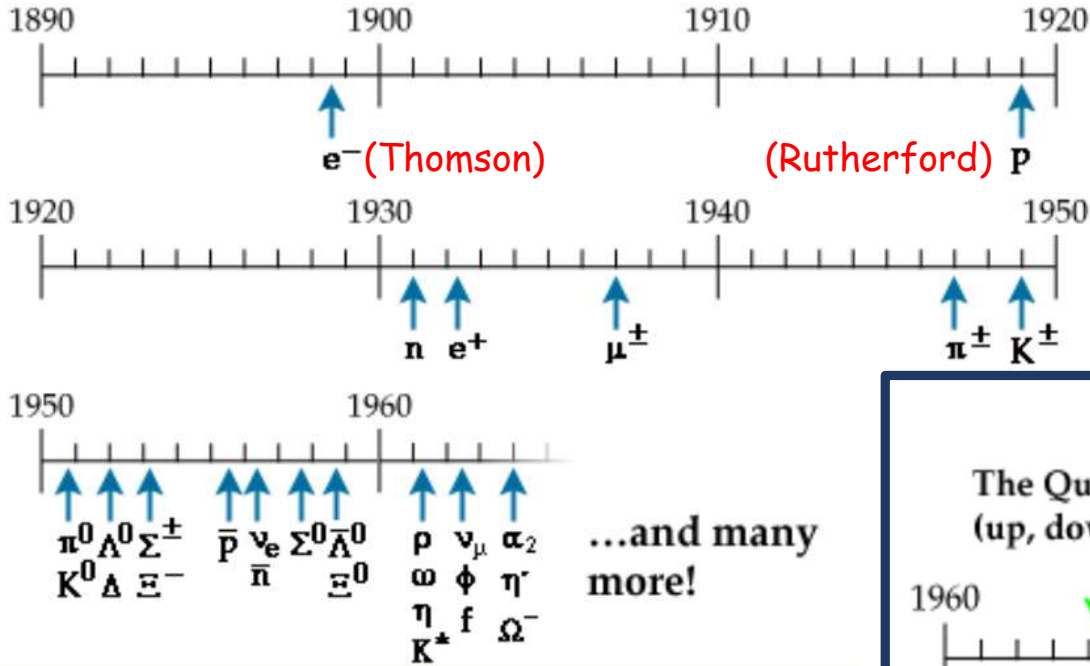
**'Lepton'** ismi; Yunanca, 'hafif' anlamındaki 'leptos' dan gelir. Aynı şekilde **'hadron'** iri, güçlü anlamındaki 'hadros' tan gelir. **'Mezon'** ismi 'orta' ve 'baryon' 'ağır' anlamındadır. Higgs bozonu parçacıkların kütle kazanmalarından sorumlu parçacıktır.



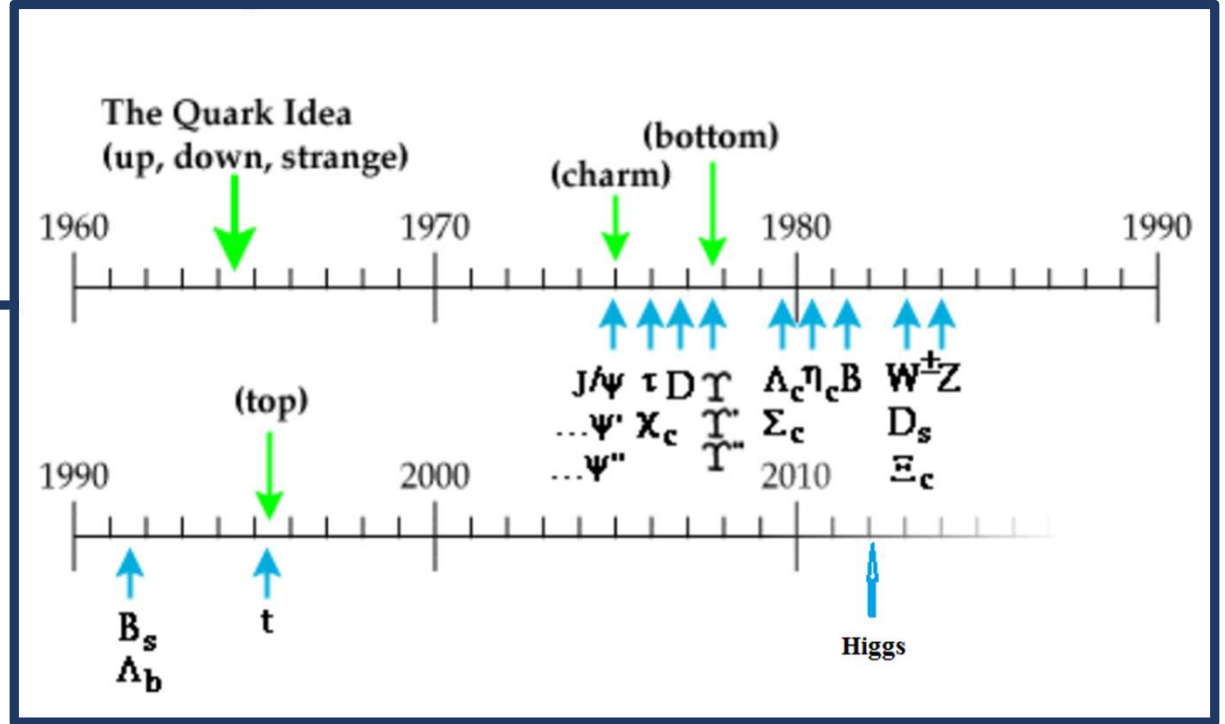


Kuarkın adı	Simgesi	Yükü (e)
Yukarı (up)	u	+2/3
Aşağı (down)	d	-1/3
Tılsımlı (charm)	c	+2/3
Acayip (strange)	s	-1/3
Üst (top) ya da Doğruluk (truth)	t	+2/3
Alt (bottom) ya da Güzellik (beauty)	b	-1/3

- Kuarklar ve leptonlar 3 aile olarak karşımıza çıkarlar. Bu parçacıkların spinleri  $\frac{1}{2}$ ' dir. Gluon (8 tane), foton ( $\gamma$ ), W ve Z bozonlarının spinleri 1 'dir ve aracı parçacıklardır. Higgs bozonu ise spini sıfır olan bir parçacıktır ve kütle kazandırmaktan sorumludur.
- Kuarklar doğada serbest olarak bulunamazlar, **hadronlar (mezon ya da baryon) olarak bağlı durum oluştururlar**. Kuarklar renk yükü denen bir kuantum sayısına daha sahiptirler.



Keşfedildikleri yıllara göre parçacıklar



"If I could remember the names of these particles, I would have been a botanist." E. Fermi 😊

'Bu parçacıkların isimlerini hatırlayabilseydim, bir botanikçi olurum'



## 2. Doğal Birim Sistemi

**Elektron volt (eV):** Bir elektronun 1 Volt' luk bir potansiyel fark altında kazandığı enerjiye denir.

- Saniyede 1 adım atan  $m=60$  kg kütleli bir kişinin kinetik enerjisi ( $K=1/2 mv^2$ ) yaklaşık olarak  $K \sim 20$  J

$$1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV}$$

$$K=20 \text{ J} = 1,25 \times 10^{20} \text{ eV} = 1,25 \times 10^8 \text{ TeV}$$

- LHC' de proton demetinin enerjisi  $E_p=6,5$  TeV

- SI birim sistemi günlük hayattaki cisimler için uygundur ancak parçacık fiziği için oldukça büyük birimlerdir.

Çalışma Alanı	Atom ve Molekül Fiziği	Nükleer Fizik	Parçacık Fiziği
Tipik Enerji Ölçeği	eV- keV	MeV	GeV - TeV...

Yüksek enerji fiziği

## Doğal Birim Sistemi ( $\hbar = c = 1$ )

$$c = 2,99792458 \times 10^8 \text{ m/s}$$

$$\hbar = 1.054571726 \times 10^{-34} \text{ J.s} = 6.58211928 \times 10^{-22} \text{ MeV.s}$$

$$\hbar: J.s \quad c: m/s$$

$$\hbar = c = 1$$

- $c = 1 \Rightarrow [hız] = \text{sayı}$   
 $\Rightarrow [uzunluk] = [zaman]$
  - $E^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4 \Rightarrow E^2 = p^2 + m^2$   
 $\Rightarrow [Enerji] = [Kütle] = [Momentum]$
  - $\hbar = \frac{h}{2\pi}$
- $$\hbar = 1 \Rightarrow [Enerji] = [Zaman]^{-1} = [Uzunluk]^{-1} = [Kütle]$$



**Önemli !**

Tüm fiziksel boyutlar [uzunluk] ya da buna eşdeğer olarak [kütle]<sup>-1</sup> cinsinden ifade edilebilir.



$$\hbar = c = 1$$

$\hbar c = 1$  ve  $(\hbar c)^2 = 1$  yazarak dönüştürme yapılır:

Dönüşüm Faktörü	$\hbar = c = 1$ birim sistemi	Gerçek boyut
$1 \text{ kg} = 5.61 \times 10^{26} \text{ GeV}$	GeV	$\frac{\text{GeV}}{c^2}$
$1 \text{ m} = 5.07 \times 10^{15} \text{ GeV}^{-1}$	$\text{GeV}^{-1}$	$\frac{\hbar c}{\text{GeV}}$
$1 \text{ sec} = 1.52 \times 10^{24} \text{ GeV}^{-1}$	$\text{GeV}^{-1}$	$\frac{\hbar}{\text{GeV}}$
$e = \sqrt{4\pi\alpha}$	—	$(\hbar c)^{1/2}$

Tablolar Halzen&Martin  
"Quarks and Leptons" tan  
alınarak düzenlenmiştir.

$$1 \text{ TeV} = 10^3 \text{ GeV} = 10^6 \text{ MeV} = 10^9 \text{ KeV} = 10^{12} \text{ eV}$$

$$1 \text{ fermi} \equiv 1 \text{ F} = 10^{-13} \text{ cm} = 5.07 \text{ GeV}^{-1}$$

$$(1 \text{ F})^2 = 10 \text{ mb} = 10^4 \mu\text{b} = 10^7 \text{ nb} = 10^{10} \text{ pb}$$

$$(1 \text{ GeV})^{-2} = 0.389 \text{ mb}$$



### 3. Temel Etkileşmeler

#### Lepton aileleri

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau \end{pmatrix}$$

1. Aile

2. Aile

3. Aile

#### Kuark aileleri

$$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix} \quad \begin{matrix} \rightarrow +2/3e \\ \rightarrow -1/3e \end{matrix}$$

1. Aile

2. Aile

3. Aile



Yüksüz leptonlar nötrinolardır.

**SM çerçevesinde**, kuarklar, leptonlar ve girdikleri temel etkileşmelerin biçimsel olarak gösterilmesi. (Kütle çekimi dahil edilmemiştir)

Elektrozayıf kuvvet

Kuvvet	Görelü Şıdde †	Karakteristik Zaman	Menzil	Belirleyici olduğu durumlar
Güçlü	1	$< 10^{-23}$ s	$10^{-15}$ m	<ul style="list-style-type: none"><li><i>Kuarkları bir arada tutar</i></li><li><i>Çekirdeđi bir arada tutar</i></li></ul>
Elektromanyetik	$10^{-2}$	$10^{-20}$ - $10^{-16}$ s	$\infty$	<ul style="list-style-type: none"><li><i><math>e^-</math> ların çekirdeğe bağlanarak kararlı atom oluşturmaları</i></li><li><i>Kimyasal bağlanma</i></li></ul>
Zayıf	$10^{-5}$ (*)	$10^{-13}$ - $10^{-6}$ s	$10^{-18}$ m	<ul style="list-style-type: none"><li><i>Radyoaktif bozunmalar</i></li><li><i>Güneşteki reaksiyonlar</i></li></ul>
Kütle çekim	$10^{-39}$		$\infty$	<ul style="list-style-type: none"><li><i>Gezegenleri bir arada tutar</i></li><li><i>Güneş sistemini bir arada tutar</i></li></ul>

## Temel etkileşmeler, aracı parçacıkları ve özellikleri

Etkileşme	Aracı Parçacık	Simge	Yük (e)	Spin ( $\hbar$ )	Kütle (GeV)
Güçlü	Gluonlar (8 adet)	$g$	0	1	0
EM	Foton	$\gamma$	0	1	0
Zayıf	Zayıf Bozonlar	$W^- \cdot W^+$ ve Z bozonları	-1, +1, 0	1	$M_W=80.4$ $M_Z=91.2$
Kütle Çekim	Graviton (varsayımsal, henüz gözlenmedi)	$G$	0	2	0



Etkileşme	Yük (Ne ile bağlaşım var ?)	Teori		Ayar grubu
<b>Güçlü</b>	Renk yükü	Renk dinamiği		$SU(3)_c$
<b>Elektromanyetik</b>	Elektrik yükü	Elektrodinamik	Elektrozayıf Teori (GSW Teorisi)	$SU(2)_L \times U(1)_Y$
<b>Zayıf</b>	Zayıf hiper yük (+ Zayıf izospin)	Çeşni dinamiği		
<b>Kütleçekim</b>	Kütle + Enerji momentum tensörü	Geometrodinamik		?? Henüz tutuarlı bir kuantumlu ayar kuramı yok

**NOT:**  $S$  (Special, determinanı +1 olan matrisler)  $U$  (Üniter)

$SU(3) \rightarrow 3 \times 3$ ' lük determinanı +1 ve üniter olan matrislerin grubu demektir.



Bir etkileşmenin menzilini belirleyen nedir? Kütle çekimi ve elektromanyetik etkileşmelerin menzili neden sonsuzdur? Zayıf ve güçlü etkileşmelerin menzili neden sınırlıdır?

Bir parçacığın değiş-tokuşu için gerekli enerji  $\Delta E \sim mc^2$

Bu aracı parçacıklar Heisenberg belirsizlik ilkesinin izin verdiği süre içinde var olurlar .

$$\Delta E \Delta t \sim \hbar \quad \Delta t = \frac{\hbar}{mc^2}$$
$$\Delta x = c \Delta t = \frac{\hbar}{mc}$$

Menzil:  $\Delta x = R = \frac{\hbar}{mc}$   $\hbar = c = 1$  birim sisteminde  $R \sim 1/m$



Menzili belirleyen şey, aracı parçacığın kütlesi

- EM ve kütleçekim etkileşmelerinin aracı parçacıkları (foton ve graviton) kütlesiz olduğu için bu etkileşmelerin menzili sonsuzdur.
- Zayıf etkileşmelerin aracı parçacıkları W ve Z bozonları kütleli olduğu için, zayıf etkileşme menzili  $10^{-3}$  fm' dir.
- Güçlü etkileşmelerin aracı parçacıkları gluonlar da kütlesizdir, ancak gluonlar renk yükü taşırlar. Bu nedenle güçlü etkileşmenin menzili sonsuz değildir,  $\sim 1$  fm' dir.

Zayıf etkileşmenin menzili:

$$R = \frac{1}{M_W} = \frac{1}{80,3 \text{ GeV}} = 0,01245 \text{ GeV}^{-1}$$

$$R = 0,01245 \text{ GeV}^{-1} \frac{1 \text{ m}}{5,07 \times 10^{15} \text{ GeV}^{-1}} = 2,46 \times 10^{-1} \text{ m}$$

$$1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$$

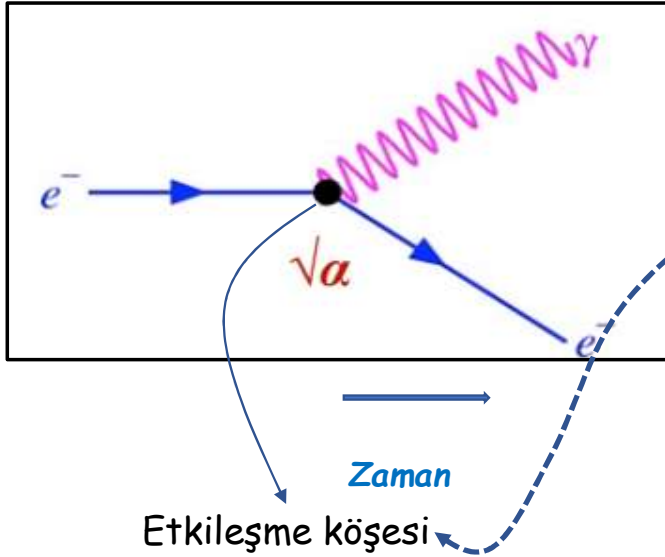
$$R \approx 2,5 \times 10^{-3} \text{ fm}$$

## 4. Korunum Yasaları

1. **Elektrik yükü (Q):** Tüm etkileşmelerde korunur.
2. **Renk yükü :** Güçlü etkileşmelerde korunur.
3. **Baryon sayısı (A):** (Tüm etkileşmelerde korunur. Baryon sayısı tüm baryonlar için +1 ve antibaryonlar için -1' dir. Kuarklar için Baryon sayısı +1/3' tür. Mezonlar için benzer bir kuantum sayısı yoktur, çünkü kuarklar net olarak kuark sayısı içermez, bir kuark bir antikuark bağlı durumudur.)
4. **Lepton ailesi sayısı (L):** Her lepton ailesi için ayrı ayrı korunur. ( $L_e, L_\mu, L_\tau$  ayrı ayrı korunur)
5. **Çeşni kuantum sayıları:** S: Acayıplık, C: Tılsımlılık .....  
Güçlü ve elektromanyetik etkileşmelerde çeşni korunur. Yüklü zayıf etkileşmelerde çeşni korunmaz.
6. **Dört-momentumun** (enerji ve çizgisel momentumun) korunumu
7. **Açısal momentumun** korunumu (spin de bir açısal momentumdur!)
8. **OZI (Okubo, Zweig, Iizuka) kuralı** (bazı bozunum modları ile ilgili bir sınırlama getirir. Temelinde asimptotik serbestlik yatar.

## 5. Kuantum Elektrodinamiği (KED) (Quantum Electrodynamics, QED)

Tüm em (elektromanyetik) olaylar aşağıdaki gösterilen temel sürece indirgenebilir.



$$g_e = \sqrt{4\pi\alpha}$$

$\alpha$ : ince yapı sabiti

Köşe faktörü:  $-ig_e Q_f \gamma^\mu$

$Q_f$ : fermiyonun elektrik yükü

→ Elektrik yükü olan parçacıklar elektromanyetik etkileşmelere girerler. Şekilde gösterilen temel köşe için elektrik yükü olan başka bir fermiyon da kullanılabilir.

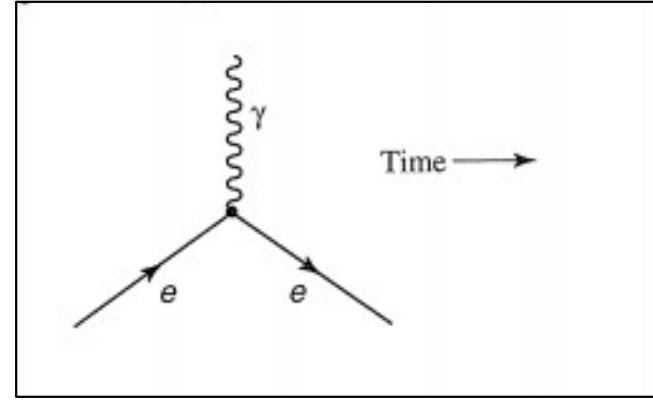
→

$g_e$ : em bağlaşım sabiti.

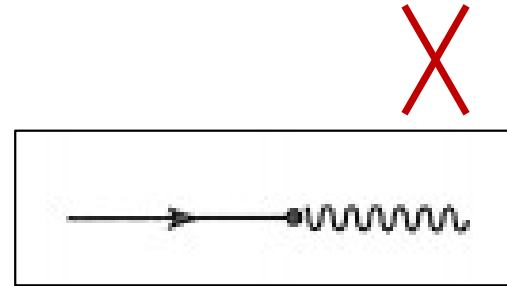
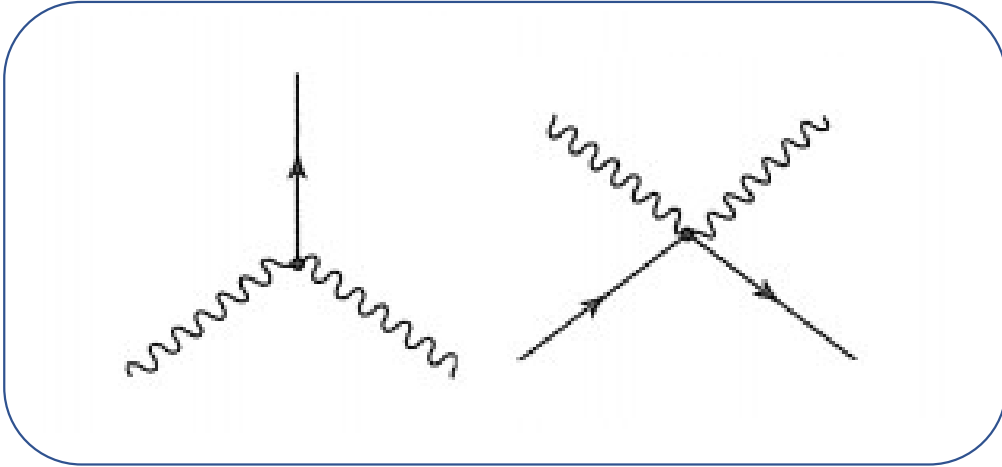
→  $\gamma^\mu$ : Gama matrisleri, 4x4'lük matrisler

! Elektrik yüküne sahip herhangi bir temel parçacık için bu köşenin benzerini çizebiliriz.

- ! Temel köşe şu şekilde de gösterilebilir:
- Temel köşeyi eğip bükerek istediğimiz topolojik konfigürasyona sokabiliriz.



X Fotonun kendisi elektrik yükü taşımadığı için aşağıdaki gibi köşeler olmaz!



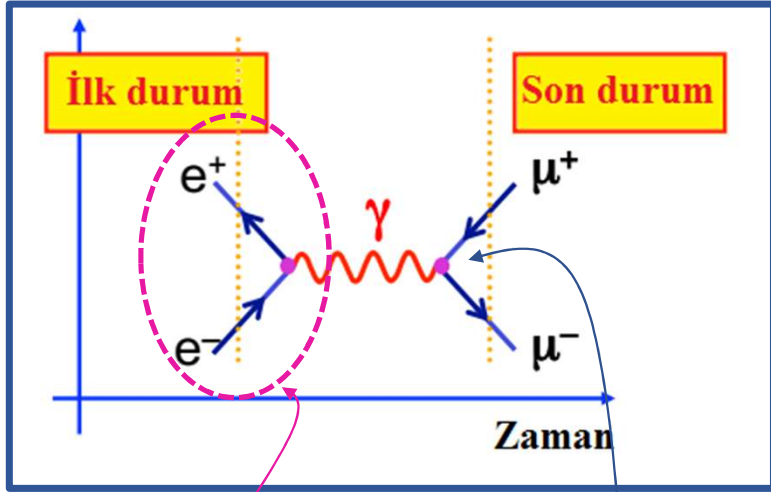
Bu şekilde bir elektron ve bir foton çizgisini birleştiren bir köşe de olamaz.

'Ağaç (tree) seviyesinde' temel köşede (en az) 3 parçacık olmalı!





## 6. Feynman Diyagramları



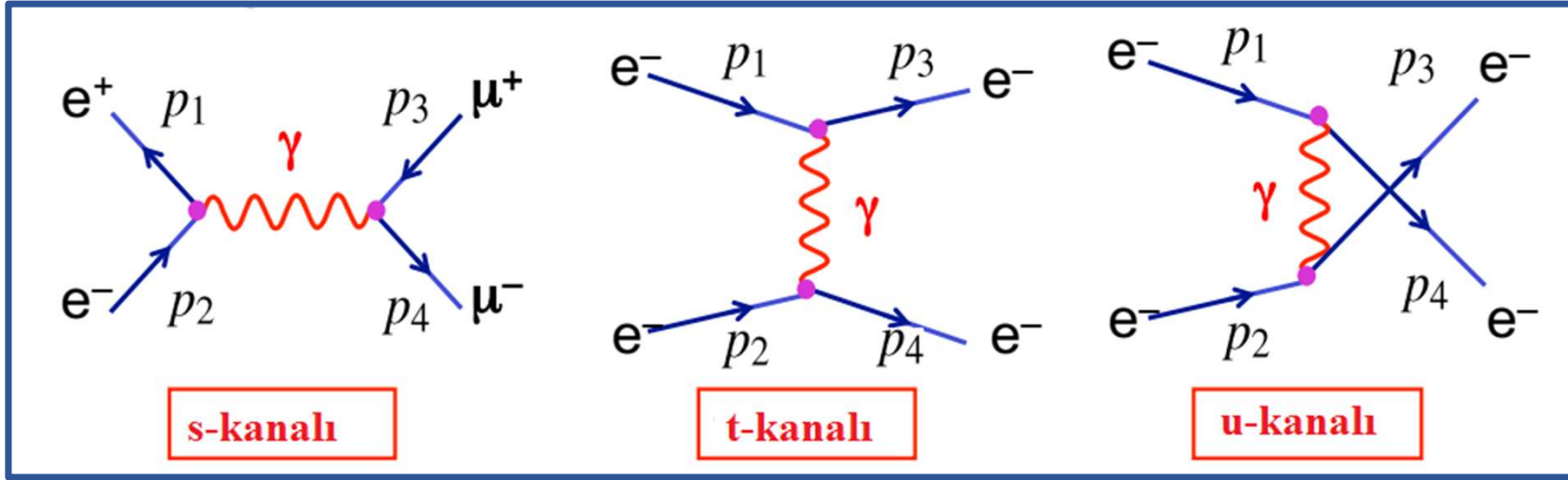
Temel köşenin  
döndürülmesi ile elde  
edilmiş

Etkileşme köşesi

Yukarıda Feynman diyagramı  
verilen süreç şu şekilde yazılır:



- Momentum uzayında parçacık etkileşmelerini temsil ediyoruz.
- Zamanı soldan sağa doğru ilerliyor olarak gösteriyoruz. (Bazı kitaplarda aşağıdan yukarıya doğru da alınıyor.)
- Antiparçacıkları zamanda geriye doğru gidiyor şekilde gösteririz.
- Önceki kesimde gösterilen, temel etkileşme köşesinden iki ya da daha fazlasını kullanarak daha karmaşık süreçleri gösterebiliriz.
- Feynman diyagramlarını çizerken her köşede korunum yasalarına (elektrik yükü korunumu, açısal momentum korunumu, ...vs) dikkat edilmelidir.
- Feynman diyagramları 'parçacıkların yörüngesi' demek **değildir** !



Her etkileşme köşesinde giren ve çıkan momentumlara dikkat!

$$s = (P_1 + P_2)^2 = (P_3 + P_4)^2$$

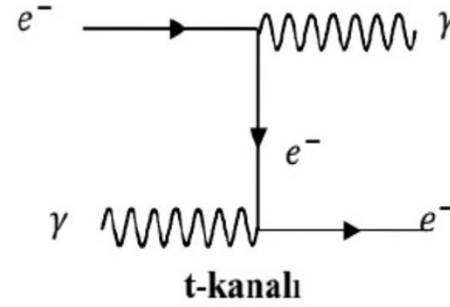
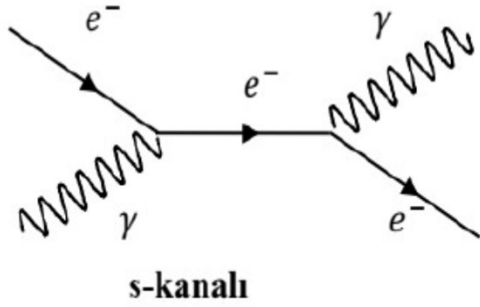
$$t = (P_1 - P_3)^2 = (P_2 - P_4)^2$$

$$u = (P_1 - P_4)^2 = (P_2 - P_3)^2$$

→  $P$  'ler dört-momentumları göstermek üzere, Lorentz invariant Mandelstam değişkenleri (doğal birim sisteminde):

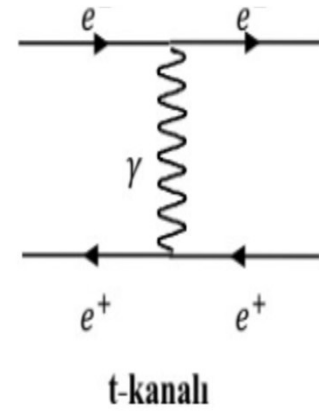
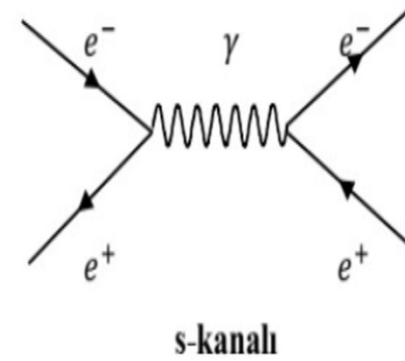
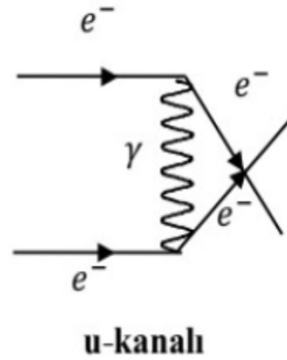
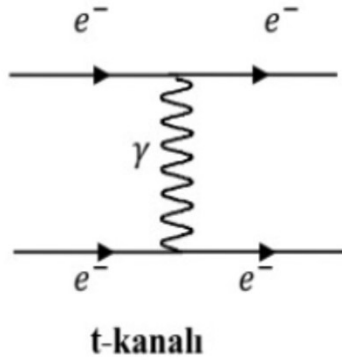
# KED için bazı temel esnek süreçler:

## 1. Compton Saçılması: $e^- \gamma \rightarrow e^- \gamma$



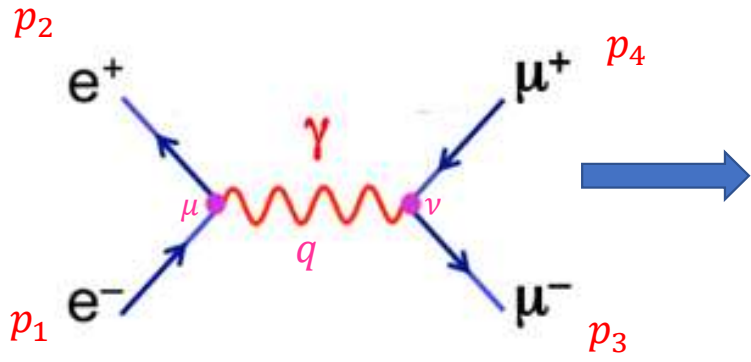
## 3. Bhabha Saçılması $e^- e^+ \rightarrow e^- e^+$ :

## 2. Möller Saçılması: $e^- e^- \rightarrow e^- e^-$



## ? Feynman Diyagramlarını Çizmek Neden Önemli?

- Feynman diyagramları, Parçacık Fiziğinde saçılma ve bozunma süreçleri ile ilgili hesaplamalar yapmak için mükemmel bir prosedür sunar. Bu tür hesaplamalar yapmak için "genlik" hesaplanmalıdır.
- Feynman diyagramlarını, gerçekleşen süreçler için kuantum mekaniksel bir geçiş genliği yazmak için kullanırız.
- Genlik  $M$  ile gösterilir.  $M$  boyutsuz bir niceliktir.
- $M'$  yi hesaplamaya başlamadan önce verilen bir bozunum veya saçılma süreci ile ilgili mümkün tüm diyagramlar çizilmelidir



Feynman diyagramında 3 eleman bulunur:

- 1) Dış çizgiler (gerçek parçacıkları gösterir)
- 2) Köşeler (her köşe için Lorentz indisi verilir)
- 3) İç çizgiler (virtüel=sanal parçacıkları gösterir)

→ Dış çizgiler üzerindeki oklar parçacık akımının yönünü gösterir.

→ Diyagramdaki her eleman  $M'$  ye katkıda bulunur.

Dış çizgiler:

elektron için	{	Gelen: ( $\rightarrow\circ$ ) : $u$
		Çıkan: ( $\circ\rightarrow$ ) : $\bar{u}$
pozitron için	{	Gelen: ( $\leftarrow\circ$ ) : $\bar{v}$
		Çıkan: ( $\circ\leftarrow$ ) : $v$
foton için	{	Gelen: ( $\sim\circ$ ) : $\epsilon_\mu$
		Çıkan: ( $\circ\sim$ ) : $\epsilon_{\mu^*}$

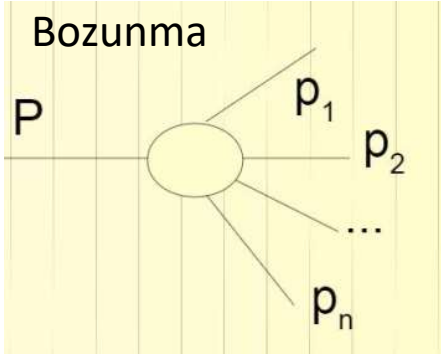
İç çizgiler (propogator terimi):

$$\text{Fotonlar: } \frac{-ig_{\mu\nu}}{q^2}$$

$$-iM = [\bar{v}(p_2)ig_e\gamma^\mu u(p_1)] \left(\frac{-ig_{\mu\nu}}{q^2}\right) [\bar{u}(p_3)ig_e\gamma^\nu v(p_4)]$$

$$M = -\frac{g_e^2}{(p_1 + p_2)^2} [\bar{v}(p_2)\gamma^\mu u(p_1)][\bar{u}(p_3)\gamma_\mu v(p_4)]$$

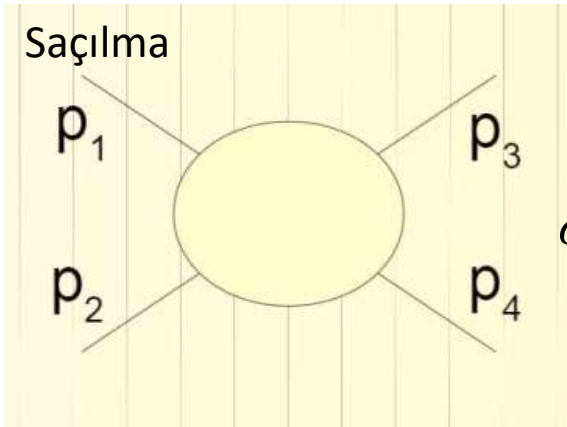
- Parçacıklarla ilgili bilgileri, **bozunma süreçleri**, **saçılma süreçleri** ve **bağlı durumlardan** alırız.



Bozunma genişliği (son durumda 2 parçacık olduğunda)

$$\Gamma = \frac{S}{32\pi^2 \hbar m} \int |M|^2 \frac{\delta^4(P - p_1 - p_2)}{\sqrt{|\vec{p}_1|^2 + m_1^2 c^2} \sqrt{|\vec{p}_2|^2 + m_2^2 c^2}} d^3 \vec{p}_1 d^3 \vec{p}_2$$

$\Gamma$ : GeV



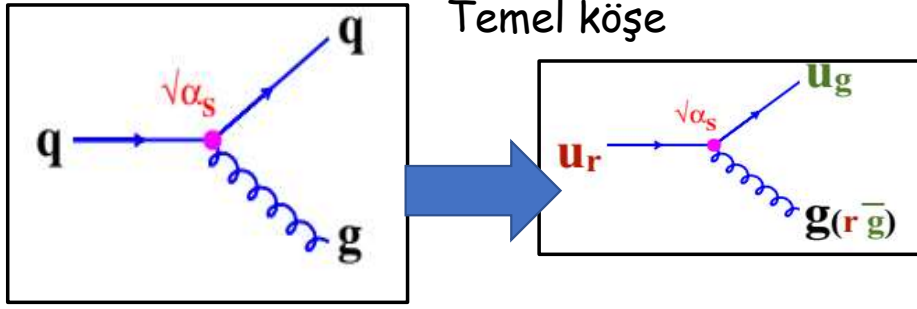
İki cisim saçılması için tesir kesiti:

$$\sigma = \frac{S \hbar^2 c}{64\pi^2 (E_1 + E_2) |\vec{p}_1|} \int |M|^2 \frac{\delta^4(p_1 + p_2 - p_3 - p_4)}{\sqrt{|\vec{p}_3|^2 + m_3^2 c^2} \sqrt{|\vec{p}_4|^2 + m_4^2 c^2}} d^3 \vec{p}_3 d^3 \vec{p}_4$$

$\sigma$ : barn



## 7. Kuantum Renk dinamiği (KRD) (Quantum Chromodynamics - QCD)



$q$  kuarkı göstermektedir. Güçlü etkileşmelerde kuark çeşnişi değişmez, kuarkın renk yükü değişir. Yanda ikinci şekilde, kırmızı bir  $u$  kuark yeşil bir  $u$  kuarka dönüşmüştür. Bu köşede renk yükü korunur.

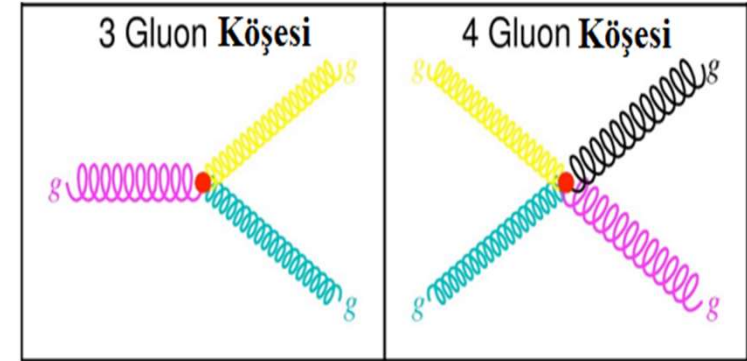
- ⇒ Renk yükü taşıyan parçacıklar güçlü etkileşmeye girer. Toplam renk yükü korunur.
- ⇒ Gluonların kendisi de renk yükü taşıdığı için 3'lü ve 4'lü gluon köşeleri de mevcuttur.

$$g_s = \sqrt{4\pi\alpha_s}$$

$\alpha_s$ : güçlü bağlaşım sabiti

$$\text{Köşe faktörü: } -ig_s \frac{\lambda^a}{2} \gamma^\mu$$

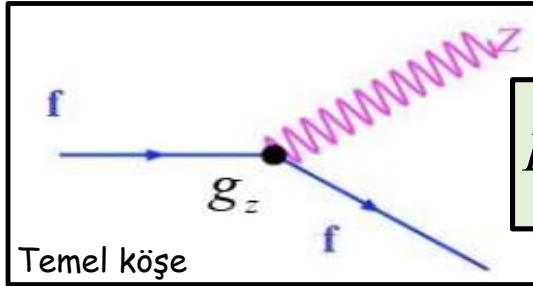
$\lambda^a$ : Gell – Mann Matrisleri,  $a = 1, \dots, 8$



Gluon-gluon bağlaşımalarının olması KRD yi daha zengin ve karmaşık yapar.

## 8. Zayıf Etkileşmeler

### 8.1. Yüksüz Zayıf Etkileşmeler



$$\text{Köşe faktörü: } -i \frac{g_Z}{2} \gamma^\mu (c_V^f - c_A^f \gamma^5)$$

- ⇒ f fermiyonu göstermektedir.  $C_V$  vektör bağlaşımı;  $C_A$  da aksiyel vektör bağlaşımıdır.
- ⇒ Yüksüz zayıf etkileşmelerde fermiyon çeşnisi **değişmez**.

→ Yüksüz zayıf etkileşme köşe faktöründe yer alan  $\gamma^5$  matrisinin tanımı şu şekildedir

$$\gamma^5 \equiv i \gamma^0 \gamma^1 \gamma^2 \gamma^3$$

Elektrozayıf teoride (GSW (Glashow-Salam-Weinberg) teorisi) vektör ve aksiyel vektör bağlaşımalarının değerleri yandaki tabloda verilmiştir:

f	$c_V$	$c_A$
$\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
$e^-, \mu^-, \tau^-$	$-\frac{1}{2} + 2 \sin^2 \theta_W$	$-\frac{1}{2}$
$u, c, t$	$\frac{1}{2} - \frac{4}{3} \sin^2 \theta_W$	$\frac{1}{2}$
$d, s, b$	$-\frac{1}{2} + \frac{2}{3} \sin^2 \theta_W$	$-\frac{1}{2}$

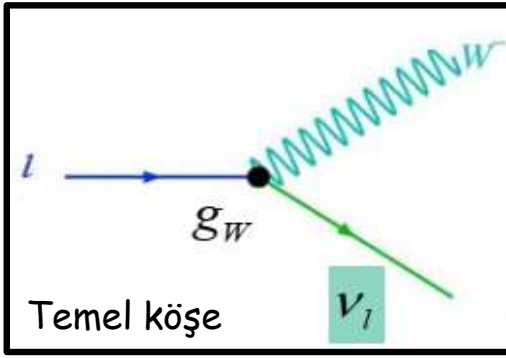
$$\theta_W = 28,75^\circ$$
$$g_Z = \frac{g_e}{\sin \theta_W \cos \theta_W}$$

$\theta_W$ : Weinberg ya da zayıf karışım açısı  
GSW: Glashow-Salam-Weinberg

## 8.2. Yüklü Zayıf Etkileşmeler

Leptonlar ve kuarklar için ayrı ayrı incelenmeli

### Leptonlar için:

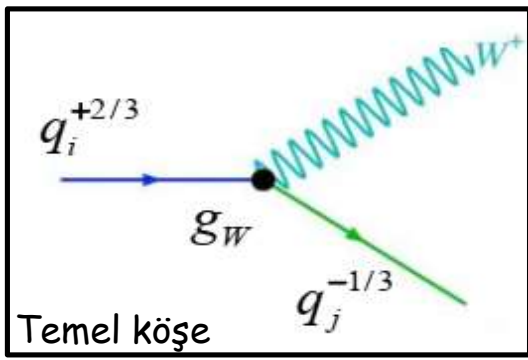


$$\text{Köşe faktörü: } -i \frac{g_W}{2\sqrt{2}} \gamma^\mu (1 - \gamma^5)$$

$$g_W = \frac{g_e}{\sin \theta_W}$$

- $l=e, \mu, \tau$
- Geçiş aynı lepton ailesi içinde olur.

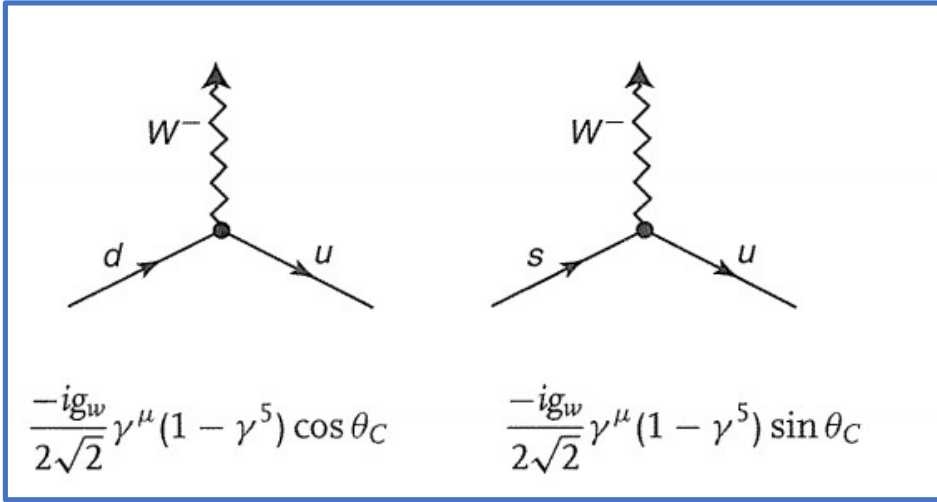
### Kuarklar için:



$$\text{Köşe faktörü: } -i \frac{g_W}{2\sqrt{2}} \gamma^\mu (1 - \gamma^5) V_{ij}$$

$$V_{ij} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix}$$

- Farklı kuark aileleri arasında geçiş mümkün. Üst sektördeki bir kuark alt sektördeki bir kuark ile bağlanabilir.
- $V_{ij}$  : CKM (Cabibbo-Kobayashi-Maskawa) matris elemanları (3 x 3' lük üniter matris)



1963 yılında Cabibbo  $d \rightarrow u + W^-$  etkileşme köşesinin  $\cos \theta_C$  faktörünü,  $s \rightarrow u + W^-$  etkileşme köşesinin  $\sin \theta_C$  faktörünü taşıdığını öne sürüyor. ( $\theta_C$  : Cabibbo açısı, bu açı küçük bir açı olmak üzere)

→ Cabibbo + GIM Mekanizması

$$\begin{pmatrix} d' \\ s' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta_C & \sin \theta_C \\ -\sin \theta_C & \cos \theta_C \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d \\ s \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix} \quad \longrightarrow \quad \begin{pmatrix} u \\ d' \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} c \\ s' \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} t \\ b' \end{pmatrix}$$

*Kütle öz durumları*

*Zayıf öz durumlar*

Zayıf etkileşmelere bu şekilde girerler.

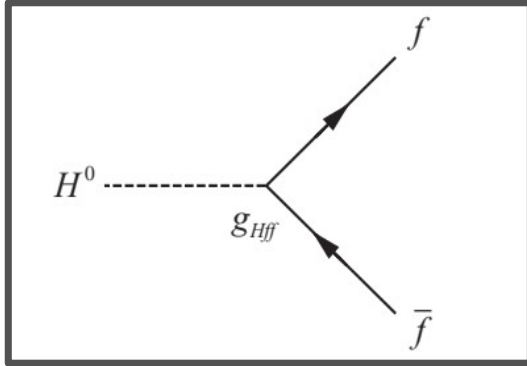
$$\begin{pmatrix} d' \\ s' \\ b' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix}$$

$$V_{ij} = \begin{pmatrix} 0.974 & 0.227 & 0.004 \\ 0.227 & 0.973 & 0.042 \\ 0.008 & 0.042 & 0.999 \end{pmatrix}$$



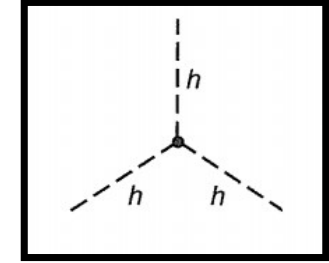
Köşegen üzerindeki elemanlara dikkat ediniz. Bunlar aynı aile içindeki geçişleri gösteriyor.

## 9. Higgs Bozonu

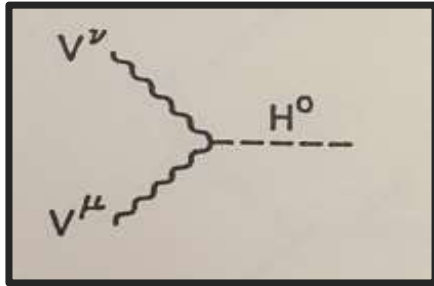


### Higgs-fermion-antifermion etkileşmesi

$$g_{Hff} = \frac{g_W}{2} \left( \frac{m_f}{M_W} \right)$$



### 3' lü Higgs etkileşmesi

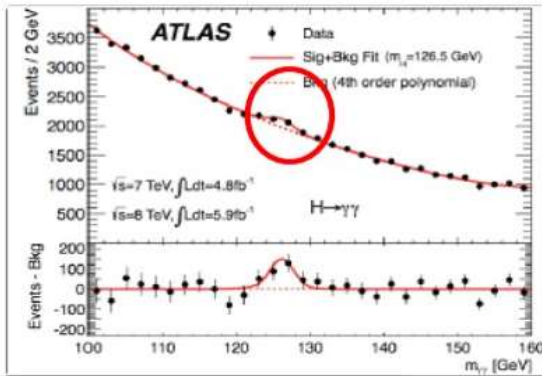


### Higgs - vektör (ayar) bozon etkileşmesi

$$V = W \text{ ya da } Z$$

$$g_{HVV} = g_V M_V$$

Higgs bozonu ile ilgili bir benzeme:



## 10. SİMETRİLER

- Doğada tüm simetriler bir korunum yasasına yol açar, başka bir ifade ile her korunum yasası altında yatan bir simetriyi açıklar (Emmy Noether, 1882-1935)
- Temel simetriler, hareket denklemlerinde kendini gösterir.



Simetri	Korunum Yasası
Zaman Ötelemesi	Enerjinin Korunumu
Uzaysal Öteleme	Çizgisel Momentumun Korunumu
Dönme	Açısal Momentumun Korunumu
Ayar Dönüşümü	"Yük" Korunumu

Uzay - zaman simetrileri

İçsel simetri



## Sürekli ve Kesikli Simetriler

- Sürekli simetriler, sürekli bir parametre setine bağlıdır. Kesikli simetriler bir çeşit yansıma ile ilgilidir, grup elemanları sadece tam sayılı değerlerle etiketlenir.

Sürekli Simetriler	Kesikli Simetriler
Uzayzaman Simetrileri (Uzay ötelemesi, zaman ötelemesi, dönme)	Parite (P) , Yük Eşlenikliği (C), Zaman Terslenmesi (T)

## Global ve Lokal (yerel) Simetriler

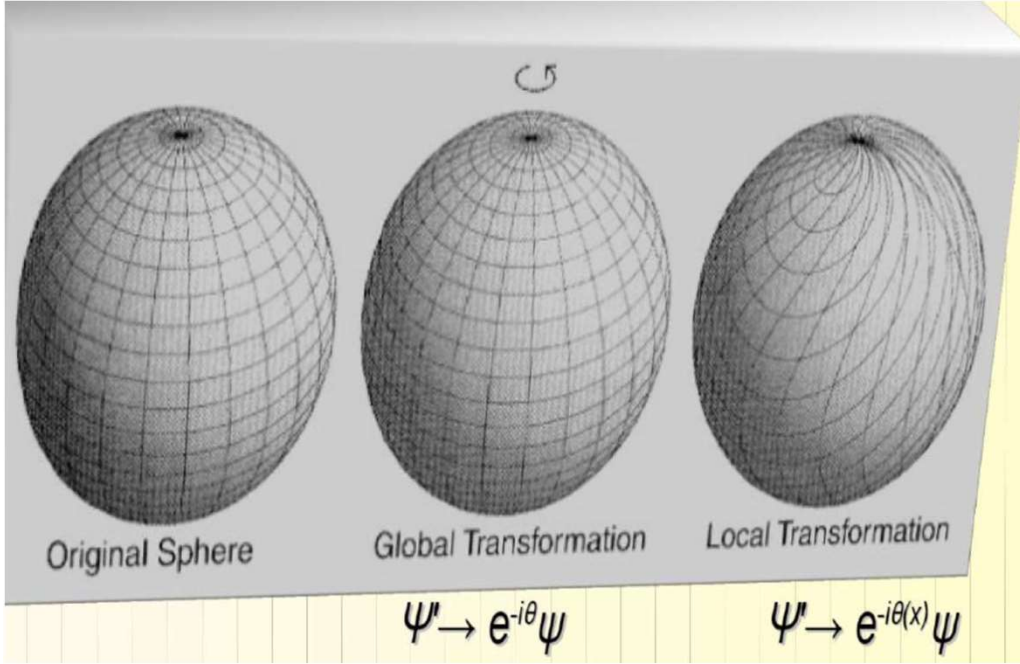
- Global simetriler, uzayzamanın her noktası için geçerli olan simetrilerdir. Lokal (yerel) simetriler uzayzamanın farklı noktalarında farklı dönüşüm özelliğine sahiptir.



- Kuantumlu Alan Teorisinde simetrilerin özel bir anlamı vardır.
- Her bir kuvvet iç simetri prensibinden üretilir. Yerel ayar değişmezliği ayar bozonlarını tahmin eder.



A vektör potansiyel, V de skaler potansiyel olmak üzere



Elektromanyetizmanın potansiyel formülasyonu

$$\vec{B} = \vec{\nabla} \times \vec{A}$$
$$\vec{E} = -\vec{\nabla} V - \partial \vec{A} / \partial t$$

**Örneğin,** ayar dönüşümleri altında elektrodinamiğin invaryanlığı elektrik yükünün korunumuna yol açar. Bu içsel bir simetridir.

$$\vec{A} \rightarrow \vec{A}' = \vec{A} + \vec{\nabla} \alpha$$
$$V \rightarrow V' = V - \partial \alpha / \partial t$$
$$\psi \rightarrow \psi' = e^{iq\alpha} \psi$$

Potansiyeller ve dalga fonksiyonu için ayar dönüşümleri. Bu dönüşümler altında Maxwell denklemleri değişmez kalır.



→ Simetri işlemlerinin kümesi bir "grup" oluşturur. Grup teori; simetrilerin uygulanması ile ilgili bir matematik dalıdır.

Simetrilerin matematiksel betimlemesi  $\leftrightarrow$  Grup Teori

→ Grup tanımı: Bir  $G$  kümesi aşağıdaki özellikleri sağlıyorsa bu kümeye bir "grup" denir.

1. Kapalılık →  $\forall g, h \in G$  olmak üzere  $g \bullet h \in G$

2. Birleşme →  $\forall g, h, l \in G \Rightarrow (g \bullet h) \bullet l = g \bullet (h \bullet l)$

3. Birim eleman →  $\forall g \in G \Rightarrow g \bullet e = e \bullet g = g$   $e \in G$  mevcuttur

4. Ters eleman →  $g \bullet g^{-1} = g^{-1} \bullet g = e$  bir  $g^{-1} \in G$  mevcuttur

## Parçacık Fiziğinde Önemli Bazı Gruplar

- Fizikte ilgi çekici grupların çoğu matris gruplarıdır. Parçacık fiziğinde en çok kullanılan gruplar  $U(n)$  ile gösterilen  $n \times n$  'li üniter (birimsel) matrislerin oluşturduğu gruplardır. Üniter grupların kullanılmasının nedeni, normun (olasılığın) korunması gerekliliğidir.
- Determinantı bir olan üniter matrislerin topluluğu bir grup oluşturuyorsa bu gruplara da  $SU(n)$  denir. Burada S: Special (özel)
- Grubun elemanları reel ise, böyle üniter matrislerin oluşturduğu gruba **ortogonal grup denir  $O(n)$**  ile gösterilir.

Grup adı	Boyut	Gruptaki Matrisler
$U(n)$	$n \times n$	Üniter $UU^\dagger = U^\dagger U = 1$
$SU(n)$	$n \times n$	"Special" (det $U=1$ ) ve üniter
$O(n)$	$n \times n$	Ortogonal $\tilde{O}O = O\tilde{O} = 1$
$SO(n)$	$n \times n$	"Special" (det $O=1$ ) ve ortogonal

## Kaynaklar

1. "Introduction to Elementary Particles" , D. Griffiths, Wiley, 2nd revised edition, 2013.
2. "Particle Physics" , B.R. Martin and G. Shaw, 3rd edition, John Wiley & Sons, 2008.
3. "Introduction to High Energy Physics" , D. H. Perkins, 4th edition, Cambridge Univ. Press, 2000.
4. "Quarks and Leptons-An Introductory Course on Modern Particle Physics" , F. Halzen and A. D. Martin, John Wiley & Sons, 1984.
5. "Introduction to Nuclear and Particle Physics" , A. Das and T. Ferbel, World Scientific, 2nd edition, 2006.
6. "The Particle Hunters" , Y. Ne'eman and Y.Kirsh, Cambridge University Press, 2nd edition, 1996

## ÖZET

- Parçacık fiziği maddenin temel yapı taşlarının neler olduğunu ve bu temel yapı taşlarının birbirleri ile nasıl etkileştiklerini (temel etkileşmeleri) anlamaya çalışır.
- Temel yapı taşlarının neler olduğunu anlama çalışmalarının temelini günümüzde modern parçacık hızlandırıcıları ve dedektörleri (algıçları) oluşturuyor.
- **Temel parçacık fiziği**, doğal olarak kuantum alan teorisinin bir konusudur. Atomaltı dünyadaki etkileşmeleri anlatan bir teori olarak kuantum alan teorisinin başarısı, "**Standart Model (SM)**" olarak şekil bulmuştur.
- SM temel parçacık spektrumunda kuarklar, leptonlar, ayar bozonları ve Higgs bozonu bulunur.
- Feynman diyagramları, Parçacık Fiziğinde saçılma ve bozunma süreçleri ile ilgili hesaplamalar yapmak için kolaylık sağlar.
- Her bir kuvvet iç simetri prensibinden üretilir. Yerel ayar değişmezliği ayar bozonlarını tahmin eder.