

# Parçacık Fizikine Giriş

Orhan ÇAKIR  
Ankara Üniversitesi

HPFBU 2014, 3-10 Şubat 2014, Gaziosmanpaşa Univ., Tokat

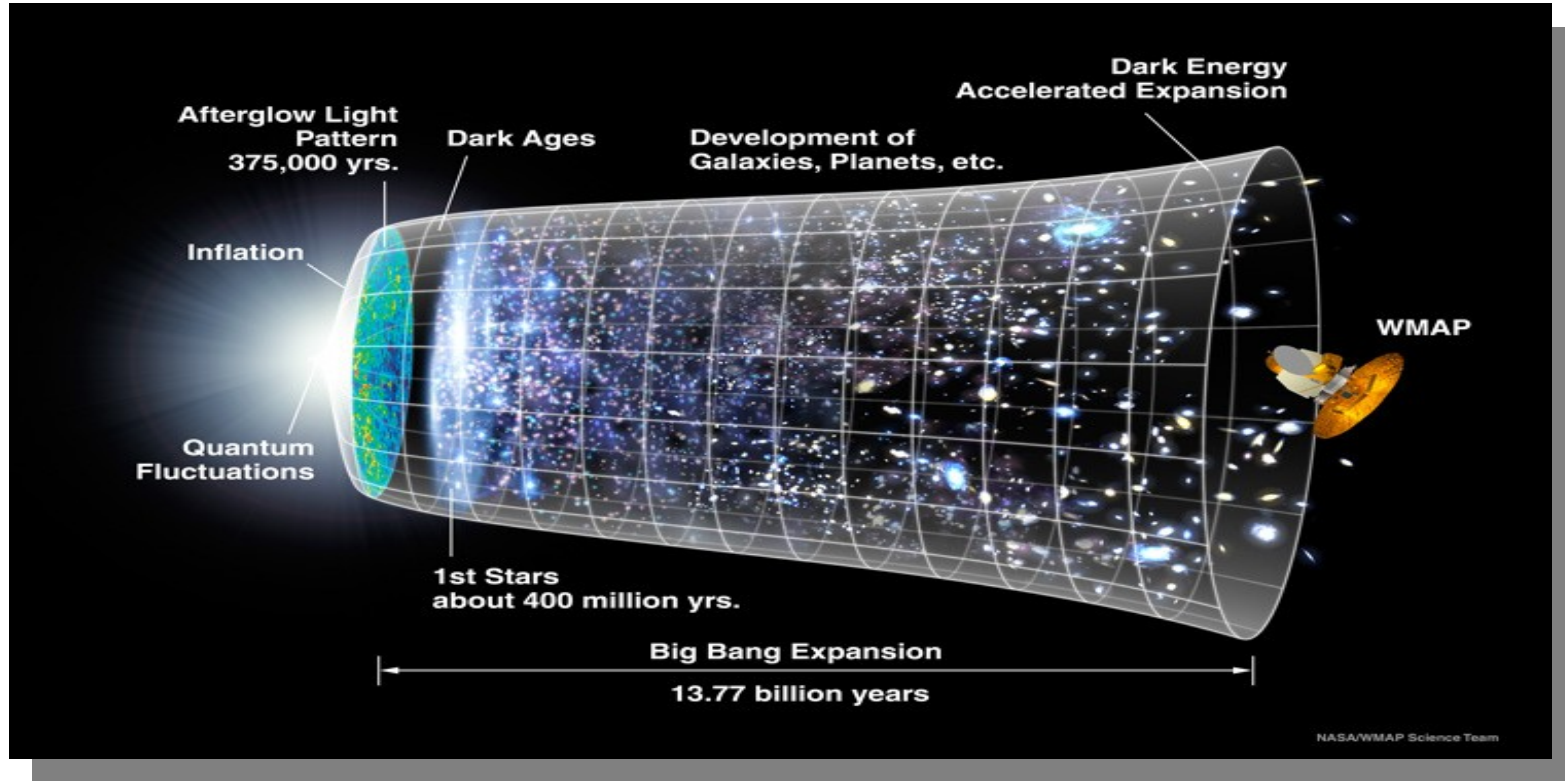
# Konu Başlıkları

- Tarihsel giriş
- Doğanın kuvvetleri
- Parçacık fiziğinde simetriler
- Temel parçacıklar ve etkileşmeler
- Çarpıřma tesir kesitleri
- Parçacık bozunumları
- Standart Model
  - Ek: Parçacık fiziğinde birimler

# Parçacık Fiziği

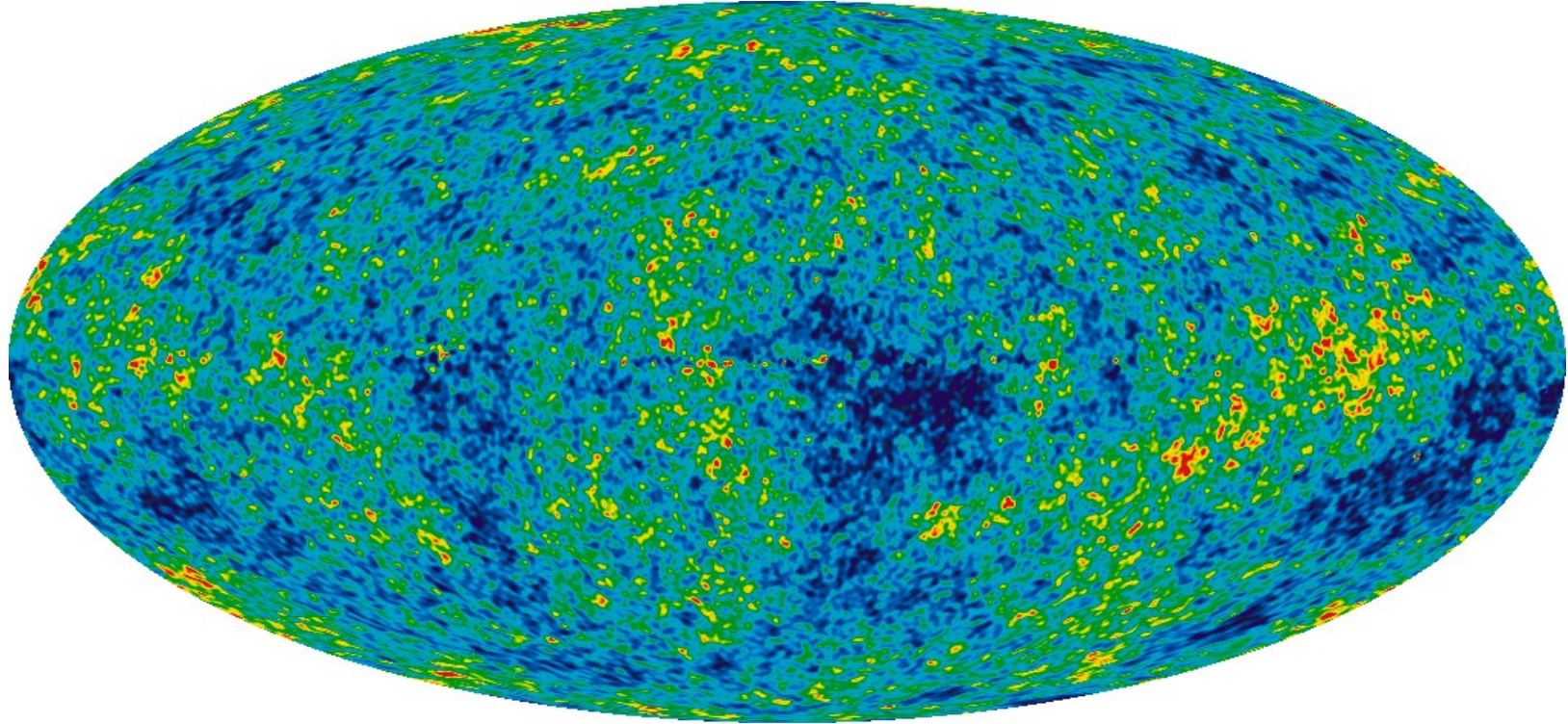
- Parçacık fiziği, **erken evren** hakkında bilgi sahibimiz olmamıza yardım eder, çünkü erken ( $\sim 10^{-10}$  s) evrene (o zaman daha fazla enerjetik  $\sim 10^{15}$  °K, şimdi ise  $\sim 3$  °K CMB) benzer koşullar **parçacıkların çarpışması** kullanarak küçük bir hacimde oluşturulabilir. Dünyada en büyük **parçacık hızlandırıcısı ve çarpıştırıcısı** CERN/İsviçre de büyük hadron çarpıştırıcısıdır.
- Temel fermiyonlar, **leptonlar ve kuarklar**, şimdiki bilgilerimize göre başka parçacıklardan yapılmamış olan en temel parçacıklardır. Fermiyonların spin kuantum değerleri kesirlidir ( $\frac{1}{2}$  gibi). Bu parçacıklar, spin değerleri kesirsiz (1 gibi) olan **bozonlar** sayesinde birbirleri ile etkileşirler.
- Kuarklar, leptonlar ve kütleli bozonlar **Higgs alanı** ile etkileşerek kütle kazanır. Evrende **gözlenen/bilinen maddenin** kütlelerinin sadece küçük bir kısmı ( $\sim 1\%$ ) Higgs mekanizmasından gelmektedir, fakat maddenin oluşabilmesi için de bunun çok önemli olduğu bilinmektedir.

# Evrenin Zaman Çizgisi



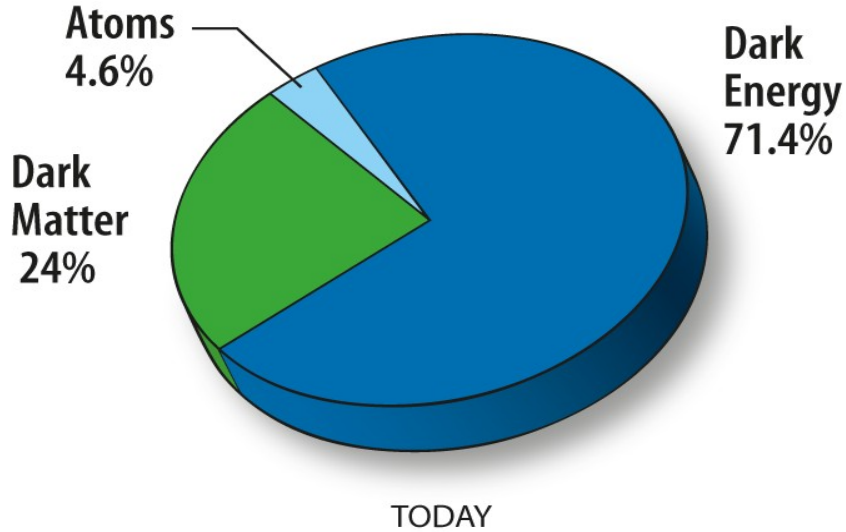
Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) görevi tüm gökyüzünde **kozmetik mikrodalga radyasyonun (CMB) özelliklerini ölçerek erken evrende varolan koşulları** açıklamaktır. Bu mikrodalga radyasyonu evrenin oluşumundan yaklaşık 375.000 yıl sonra yayınlanmıştır. WMAP, farklı (zıt) yönlerden (izotropik olmayan) ölçülen sıcaklıktaki farkı kullanarak mikrodalga radyasyonu resmini oluşturur. Bu resmin içeriği evrenin temel yapısı hakkında önemli bilgi verir.

# 'Gökyüzü' Mikrodalga Resmi



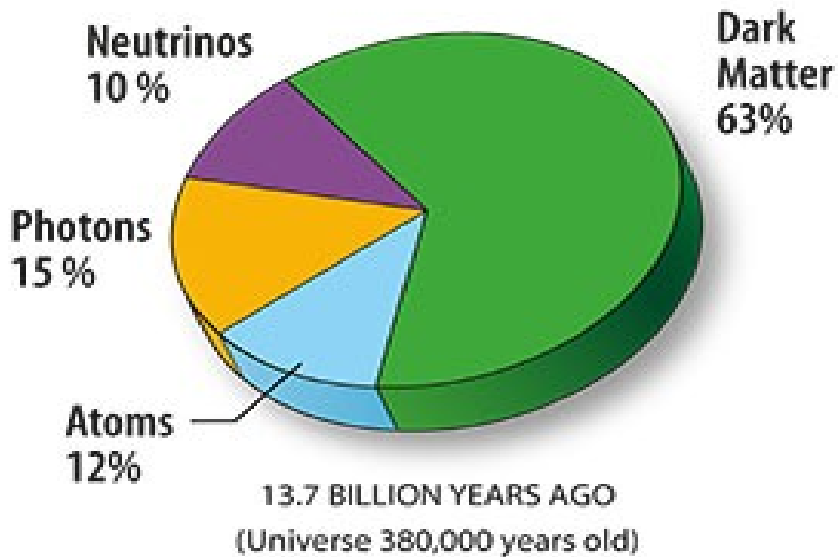
WMAP verisinden (9 yıllık) genç evrenin tüm “gökyüzü” resmi. Bu resim 13.77 milyar yıl eski olan sıcaklık dalgalanmalarını (renk farkları) gösterir, bunlar büyüyerek galaksilerin oluştuğu çekirdeklere karşı gelir. Burada çoklu-frekans verisi kullanılarak Galaksimizden gelen sinyal çıkarılmıştır. Resimde  $\pm 200$  mikroKelvin sıcaklık aralığı gösterilmiştir.

# Evrenin İçeriği



WMAP verileri evrenin %4.6 **atomlardan** oluştuğunu açıklar, bunlar yıldızlar ve gezegenlerin yapı taşlarıdır.

**Karanlık madde** evrenin %24 ünü oluşturur. Bu karanlık madde atomlardan farklı olarak ışık soğurmaz veya yaymaz. Sadece dolaylı olarak onun gravitesinden algılanmıştır.

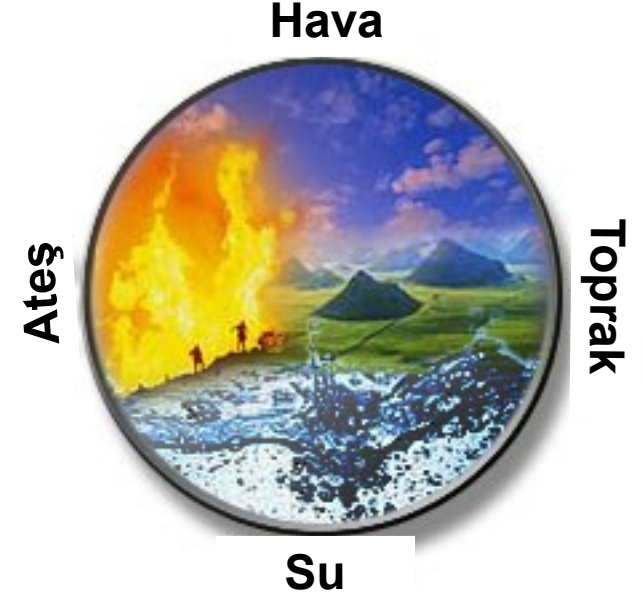


Evrenin %71.4 ü **karanlık enerji** den oluşmuştur, bu anti-gravitenin bir türü olarak etki eder. Bu karanlık enerji, karanlık madde den farklı olarak, evrensel genişlemenin bugünkü ivmelenmesinden sorumludur.

# Maddenin Yapısı

İnsanlar uzun süre aşağıdaki soruları sordular:

- Dünya neden yapılmıştır?
  - Onu birarada tutan nedir?
  - Birçok şey neden aynı karakteristiği paylaşırlar?



Empedocles 492-432 İÖ

İnsanlar, maddenin **bir kaç temel yapı taşından** (basit ve yapısız nesnelere - daha küçük bir şeyden yapılmayan) oluştuğu fikrine vardılar.

*"...gerçekte atomlar ve boşluk vardır." (Democritus 400 İÖ).*

# Elementler

Benzer kimyasal özellikleri paylaşan atom gruplarını kategori yapma (periyodik elementler tablosu) çalışmaları (Mendeleev,1869).

*Moseley'in çalışması: modern periyodik tablo, elementlerin (atomik kütleleri yerine) atom numaralarına dayanır.*

Periodic Table of the Elements

The image shows a simplified periodic table of elements. It consists of a main grid of squares and a separate row of 10 squares below it. The squares are colored in shades of brown and tan, representing different groups and periods. The main grid has 7 rows and 18 columns, with some squares missing in the first and second rows to represent the s-block elements. The separate row below has 10 squares, representing the f-block elements.

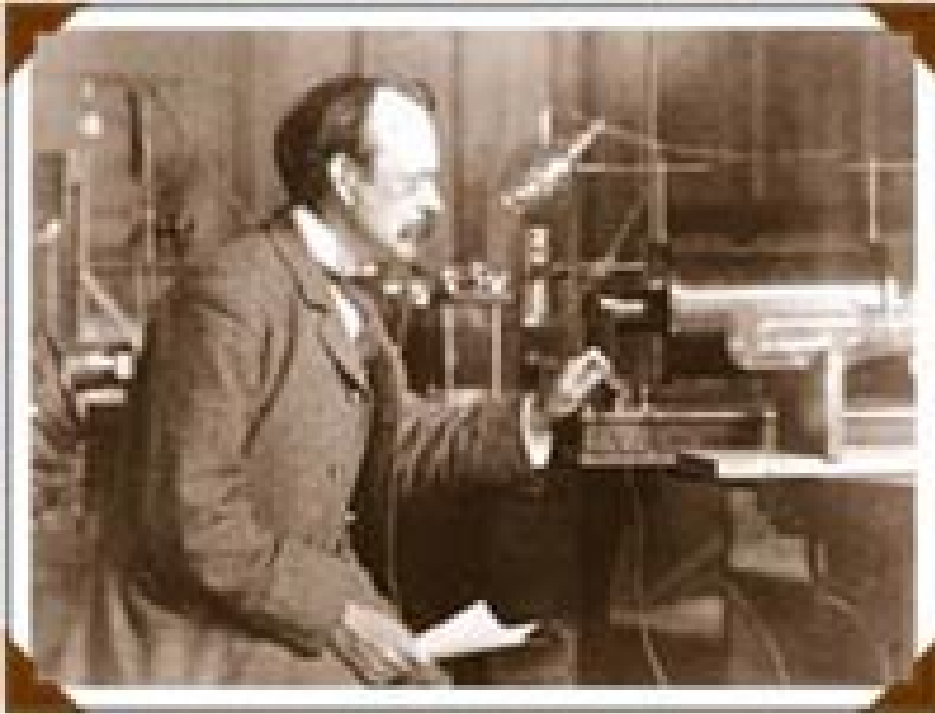
Deneyciler, bilim insanlarının atomların küçük fakat yoğun, pozitif çekirdeğe ( $N^+$ ) ve negatif elektron ( $e^-$ ) bulutuna sahip olduğunu belirlemelerine yardım ettiler.



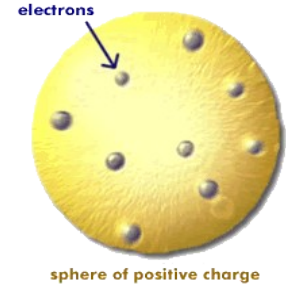
# Elektron

Temel Parçacık Fiziği, 1897'de J.J.Thomson'ın elektronu ("corpuscules") keşfetmesiyle başlar.

- Sıcak bir filamandan yayılan katot ışınlarının (parçacık demeti) bir mıknatıs ile saptırılabilmesi ile bunların elektrik yükü taşıdığı, ve bükülme yönünden de bu yükün negatif olduğu belirlenmiştir.



- atomun bir parçası..
- "üzümlü kek modeli"..

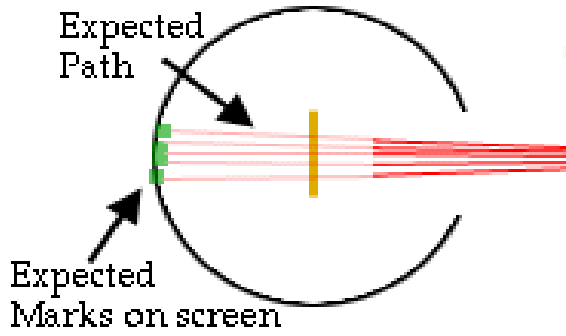


- 'electron' kelimesi ise ilk olarak 1891'de G.J. Stoney tarafından bir elektro-kimya deneyinde yükün birimini belirtmek için kullanıldı.

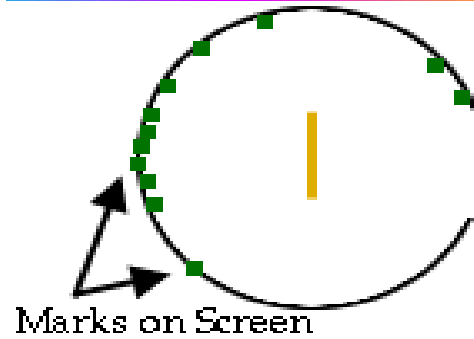
# Çekirdek

Ernest Rutherford, 1909'da teorinin geçerliliğini test etmek için bir deney hazırlamıştı. Bununla fizikçiler ilk kez mikroskopla göremedikleri küçük parçacıkların içini araştırıyorlardı.

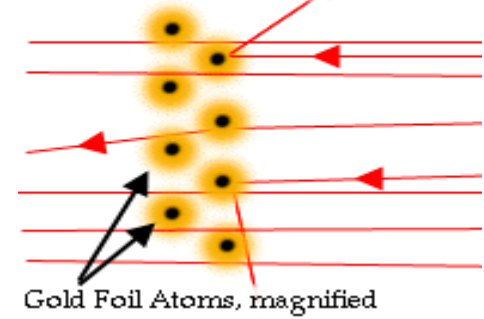
The Predicted Result:



The Result



The Positive Nucleus Theory Explains Alpha Deflection



*Alfa parçacıklarının bazıları altın levhadan büyük açılarda saçılmışlardı; bazıları ise levhanın önündeki ekrana çarpmıştı! Açıkçası başka açıklama gerekiyordu!*

- Rutherford, alfa parçacıklarının geri saçılması için atomun içinde küçük, yoğun ve pozitif yüklü birşey (**çekirdek**) olduğu sonucuna vardı.

# Foton

- **Foton (1900-1924)**

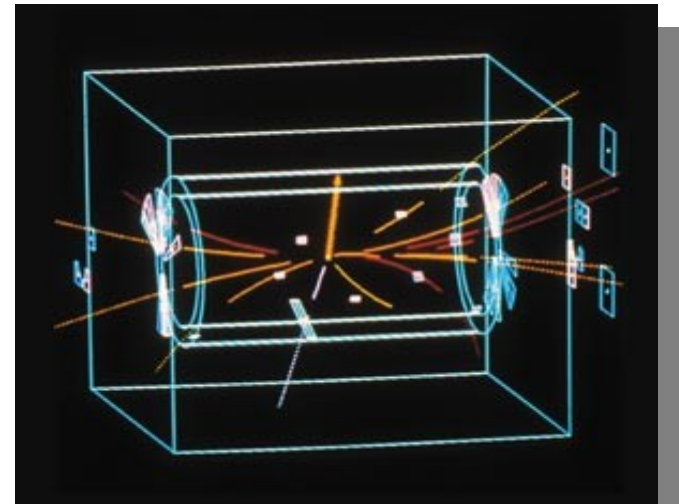
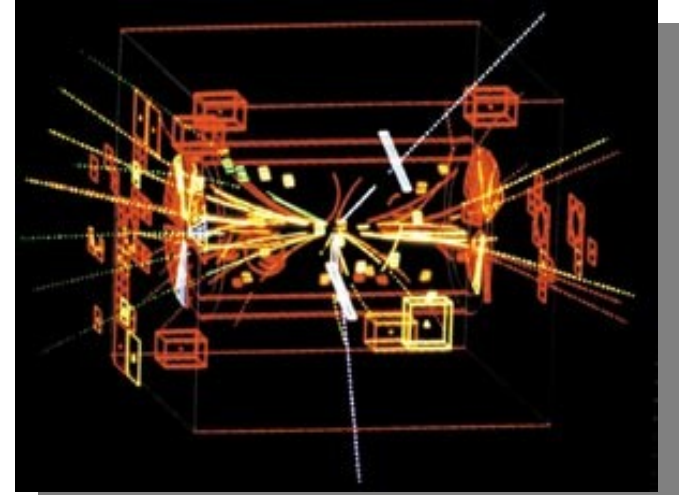
- ✓ M.Planck, siyah cisim ışımasını açıklar (1900), ışımada kuantumludur.
- ✓ A.Einstein, parçacık gibi davranan ışık kuantumu önerir (1905), fotoelektrik olay ( $E \leq h\nu - w$ ), kütle ve enerjinin eşdeğerliği, özel görelilik.
- A.H.Compton, durgun bir parçacıktan saçılan ışığın dalgaboyunda kayma meydana gelir (1923),  $\lambda' - \lambda = \lambda_c (1 - \cos\theta)$ , burada  $\lambda_c$  hedef parçacığın Compton dalgaboyudur.
- ✓ “Foton” ismi kimyacı Gilbert Lewis (1926) tarafından önerilir.

# W/Z Bozon

- **W/Z bozon**

- ✓ E=540 GeV enerjide iki etkileşme bölgesinde (UA1 ve UA2/CERN) proton-antiproton çarpışmasında 1983 yılında zayıf vektör bozonları keşfedilmiştir (C.Rubia, S.Meer). Bu  $W^+$ ,  $W^-$  ve  $Z^0$  bozonları, foton ( $\gamma$ ) ile birlikte elektrozayıf etkileşmenin 4 ayar bozonunu oluşturur.

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

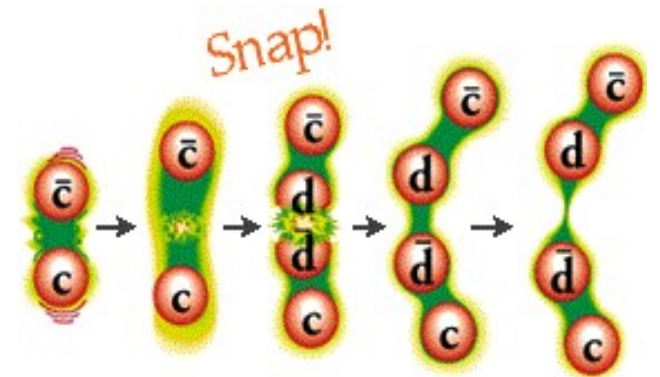
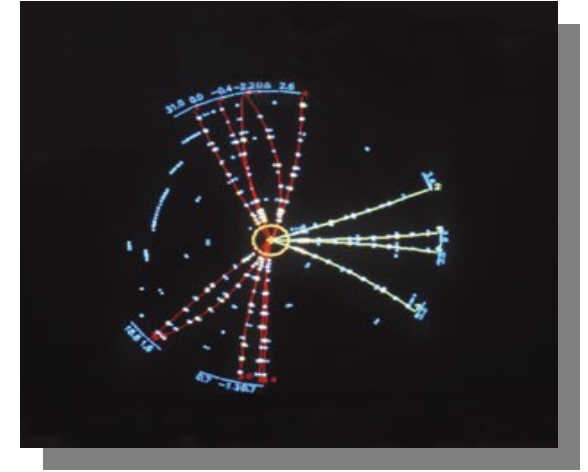


W $\rightarrow$  e $\nu$

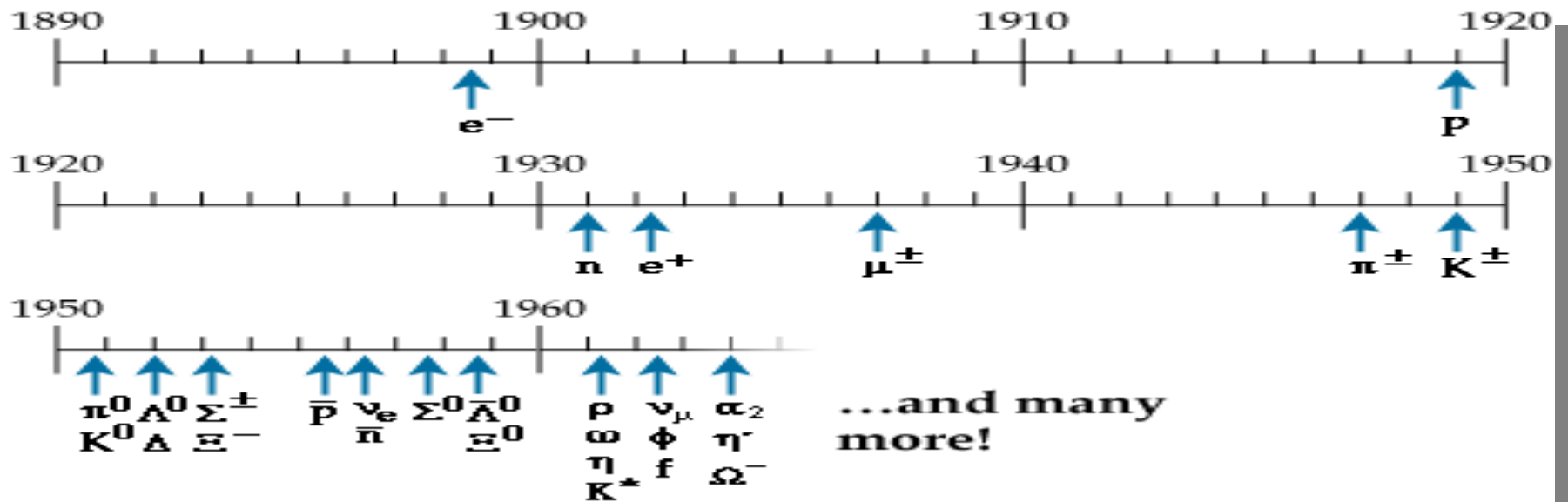
# Gluon

## • Gluon

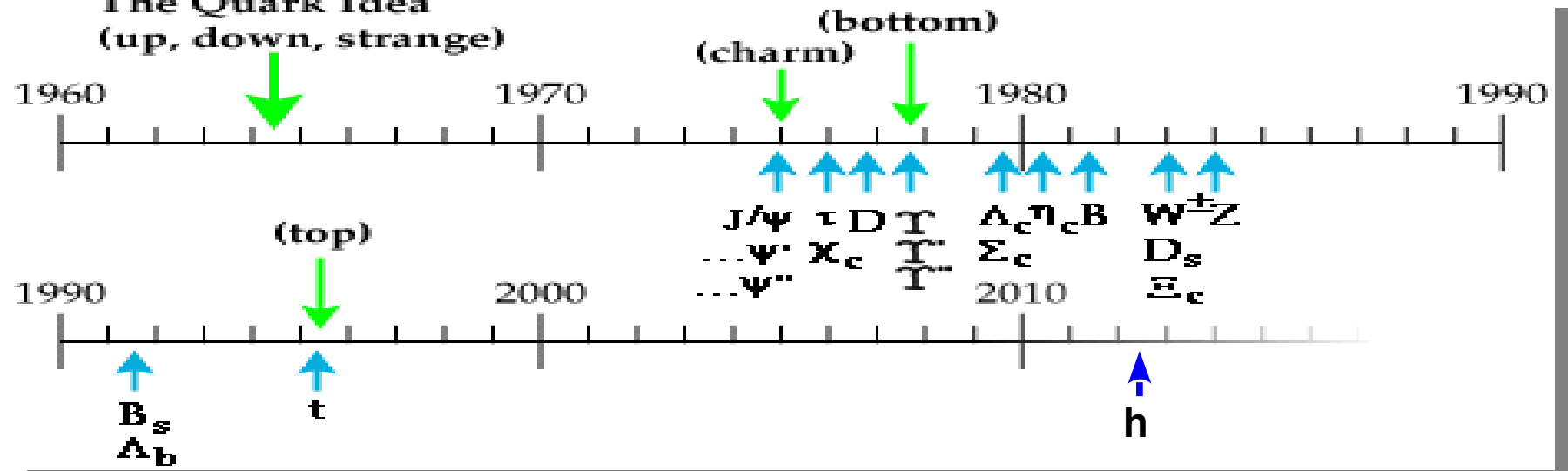
- ✓ Güçlü etkileşmelerin aracı parçacığı, 1979 yılında DESY'de deneylerde (TASSO) “üç-jet” olaylarında keşfedilmiştir.
- ✓ Kuark hapsi nedeniyle doğada kuarklar serbest bulunmaz, bu güçlü etkileşmenin bir özelliğidir.
- ✓ Kuark-antikuark çifti ayrılmaya çalışıldığında renk kuvvet alanı gerilir ve koparak yeni kuark-antikuark çiftlerinin oluşumu gerçekleşir.



# ...bazı önemli keşifler (özet)

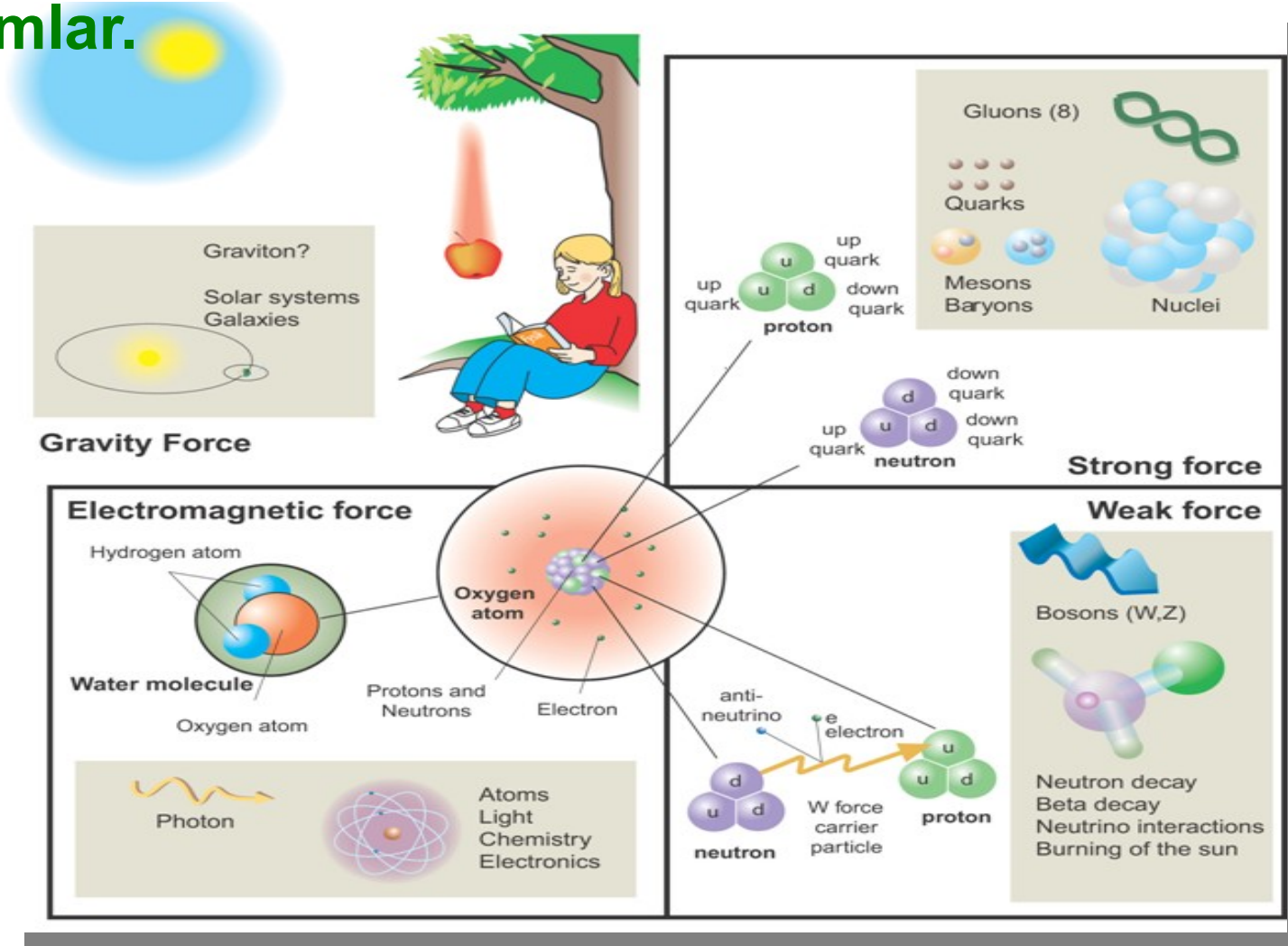


## The Quark Idea (up, down, strange)



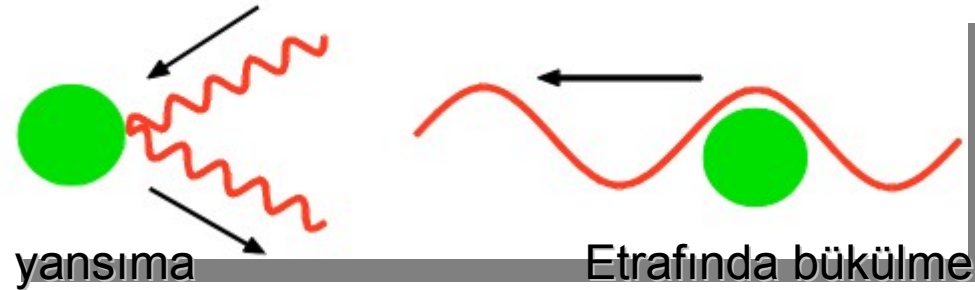
# Doğanın Kuvvetleri

Kuvvetler, fermiyonlar arasında bozon değiş-tokuşu olarak açıklanabilir, bozonun tipi kuvveti tanımlar.

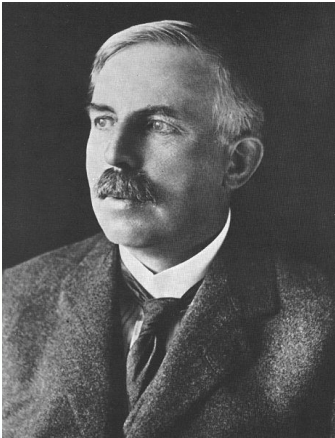


# Doğanın temel yapı taşlarının araştırılması

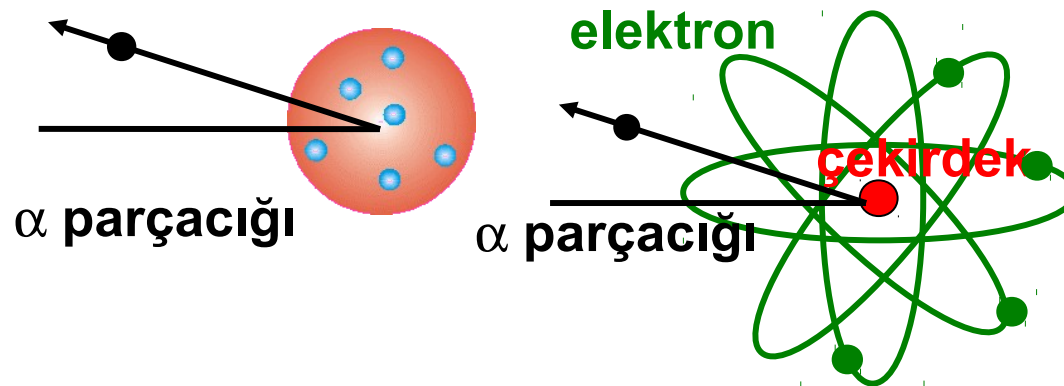
$$E = \frac{hc}{\lambda}$$



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



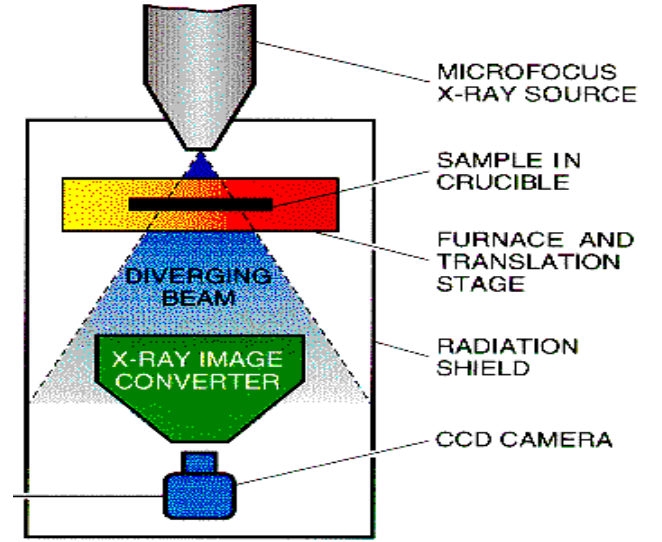
E. Rutherford,  
Deney, 1909



$$\lambda = hc/E = 1.24 \times 10^{-6} \text{ eV m} / E$$
$$E = 2.8 \times 10^6 \text{ eV} \implies \lambda = 4.4 \times 10^{-13} \text{ m}$$



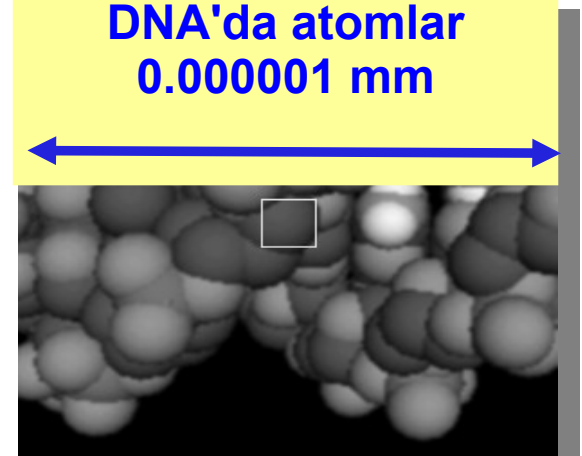
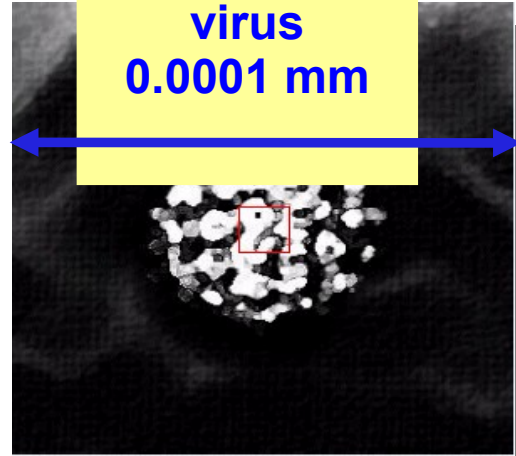
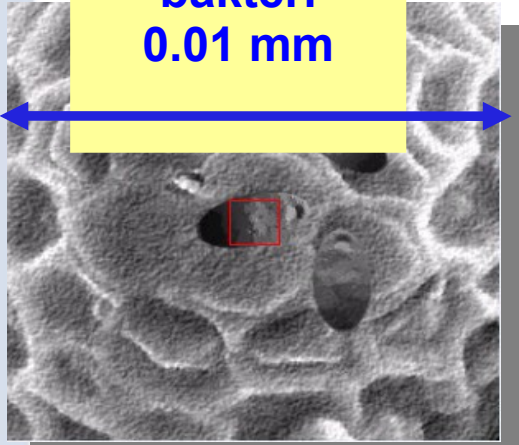
# Araştırma için araçlar



bakteri  
0.01 mm

virus  
0.0001 mm

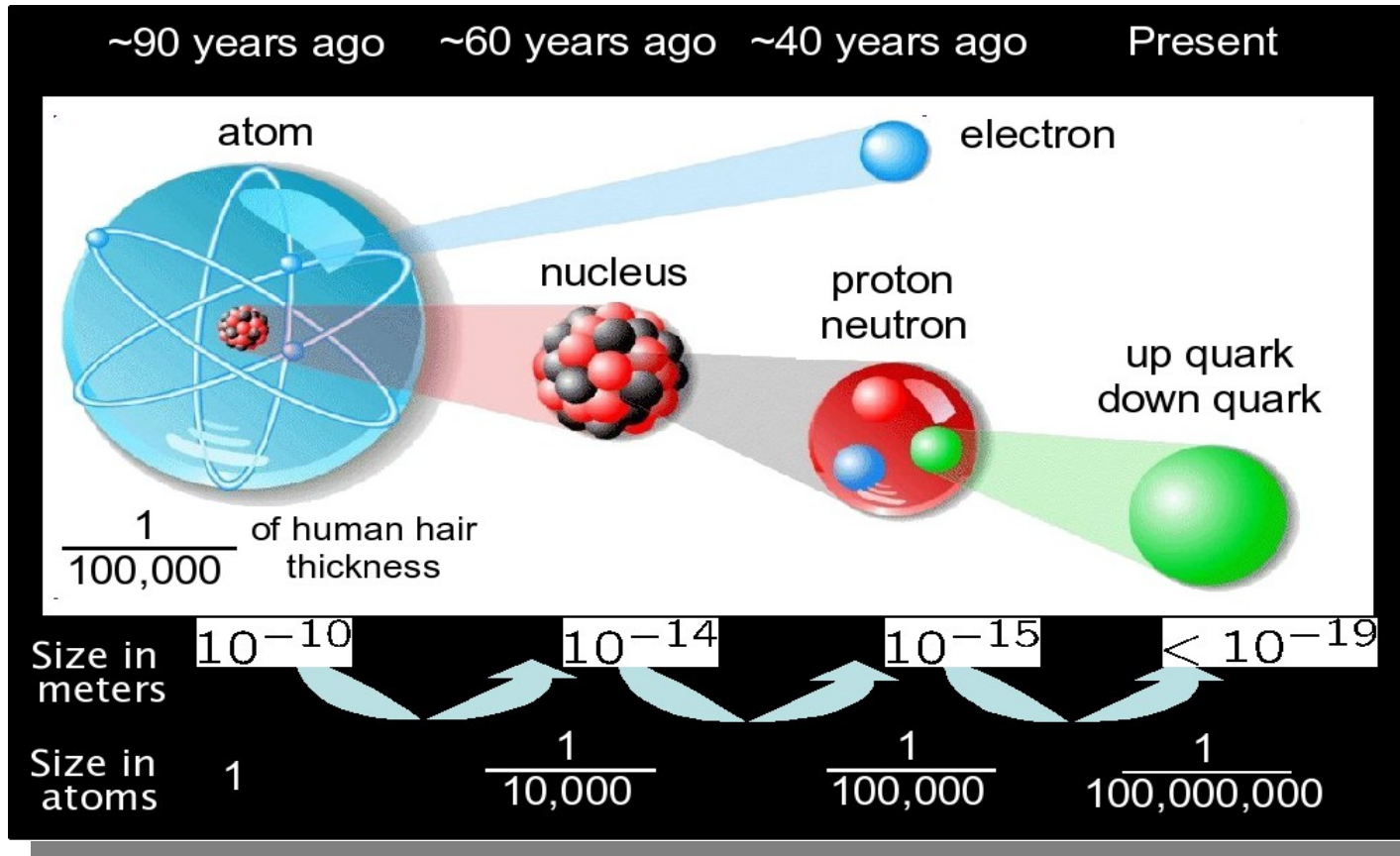
DNA'da atomlar  
0.000001 mm



- **Maddenin en derin yapısına bakmak için parçacık hızlandırıcılarına ihtiyacımız var.**

# Parçacık Fiziği

- **Madde** (spin-1/2 parçacıklar): evrenin temel elemanları – *temel parçacıklar*
- **Kuvvet** (spin-1 parçacıklar): evrenin temel kuvvetleri – *temel parçacıklar arasındaki etkileşmeler*



- PF, temel anlamda **Parçacıkları ve Kuvvetleri** belirli yasalara göre inceler.

# Simetri/Korunum yasaları

Fizik yasaları zamanda ötelemeye göre simetriktir (dün olduğu gibi bu gün de aynı biçimdedir): **Noether (1917) teoremi** bu değişmezliği enerji korunumu ile ilişkilendirir. Genel anlamda simetrilere korunum yasaları eşlik eder.

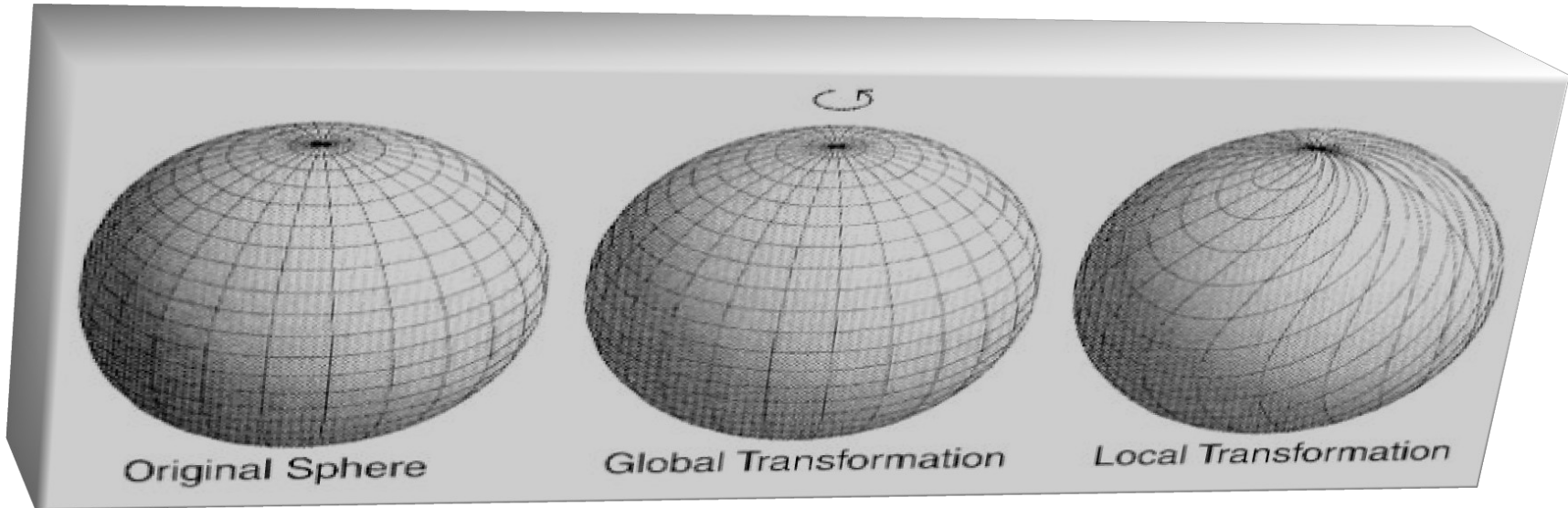


E. Noether

<b>Simetri</b>		<b>Korunum yasası</b>
zamanda öteleme	$\leftrightarrow$	enerji
uzayda öteleme	$\leftrightarrow$	momentum
dönme	$\leftrightarrow$	açısız momentum
ayar dönüşümü	$\leftrightarrow$	yük

# Parçacık Fizikinde Simetriler

- Simetri, fizikçilerin doğanın temel prensiplerini anlamak için yeni ve daha derin araştırmalarının merkezinde durmaktadır. Simetriler, Kuantum Alan Teorisinde önemli rol oynar:
  - ➔ her bir kuvvet iç simetri prensibinden türetilebilir – *yerel ayar değişmezliği ayar bozonlarını tahmin eder.*



$$\Psi' \rightarrow e^{-i\theta} \Psi$$

$$\Psi' \rightarrow e^{-i\theta(x)} \Psi$$

# Kesikli Simetritler

## Yük eşleniği (C)

- Klasik elektrodinamik C altında değişmez kalır, potansiyeller ve alanlar işaret değiştirir ancak kuvvet yük çarpanı nedeniyle değişmez kalır.
- $C|p\rangle = |\bar{p}\rangle = \pm |p\rangle$ , bütün “iç kuantum sayıları”nın (yük, baryon sayısı, lepton sayısı, acayıklık, vs.) işareti değişir, ve kütle, enerji, momentum, spin, dokunmadan kalır. Sınırlı özduruma sahiptir (photon, rho, eta vb.).
- Zayıf etkileşmelerin simetrisi değildir ( $\bar{\nu}_L$  yoktur!)
- Genişletilmiş dönüşüm “G-parite”,  $G=CR_2$  burada  $R_2=e^{i\pi I(2)}$ . Örnek: pionlar G' nin öz durumlarıdır.

# Kesikli Simetriiler - 2

## Parite (P)

- Lee ve Yang (1956) zayıf etkileşmelerde parite için bir test önerdiler.  $^{60}\text{Co} \rightarrow ^{60}\text{Ni} + e + \bar{\nu}_e$  sürecinde beta bozunmasında elektronların çoğu çekirdek spinine zıt yönde yayınlanır. Parite, güçlü ve elektromagnetik etkileşmelerin bir simetrisidir, fakat zayıf etkileşmelerde bozular.

Skaler	$P(s)=s$
Sözde-skaler	$P(p)=-p$
Vektör	$P(v)=-v$
Sözde-vektör (eksensel vektor)	$P(a)=a$

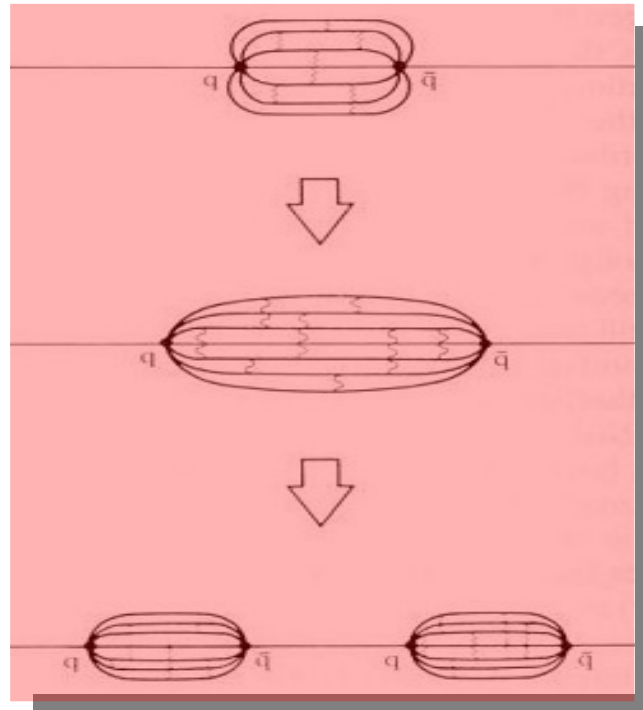
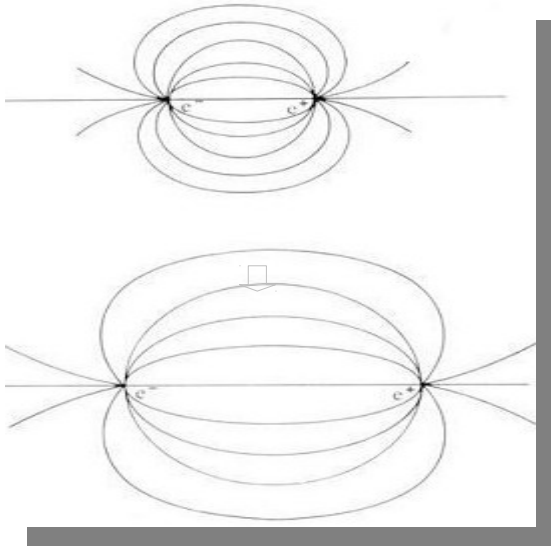
- nötrinolar sol-el, antinötrinolar ise sağ-el davranırlar.

# Hadronlar

Hadronlar kuarkların renk birliği bağlı durumlarıdır.

- Mezonlar, kuark ve anti-kuarkların bağlı durumlarıdır ( $q_i \bar{q}_j$ ).
- Baryonlar, 3 kuark bağlı durumlarıdır ( $q_i q_j q_k$ ).
- Kuarklar, hadronlar içine hapsedir.

*Yükler birbirinden ayrıldığında Elektrik alan çizgileri seyrekleşir.*



**Kuarklar birbirinden ayrıldığında renk kuvveti çizgileri bir tüp içinde yoğunlaşır. Yeterli kuvvet uygulandığında bu ikiye ayrılacaktır.**

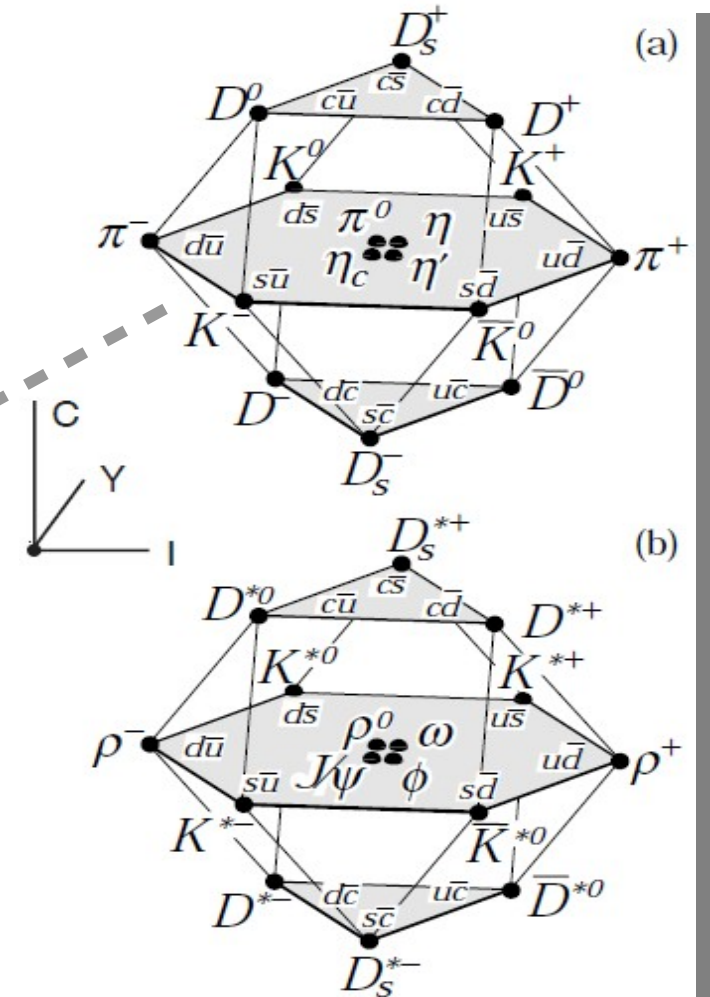
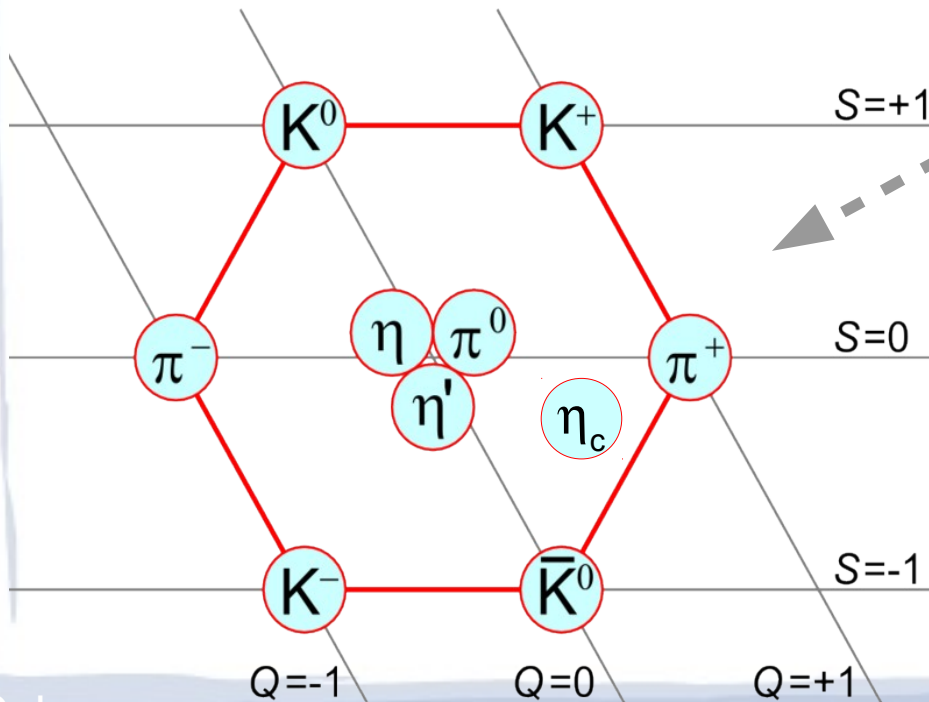
# Mezonlar

Yörünge açısai momentumu  $l$  ise, parite  $P=(-1)^{l+1}$  ile verilir. Mezonlar  $qq$  için yük eşleniği  $C=(-1)^{l+s}$  ve G-parite  $(-1)^{l+s}$  ile verilir.  $SU(4)$  sınıflandırmasında  $4 \times \bar{4} = 15 + 1$  yapısı elde edilir. Spektroskopik gösterim:  $n^{2s+1}l_J (J^{PC})$

$l=0$ : sözde-skaler ( $0^+$ ) ve vektor ( $1^-$ )

$l=1$ : skaler ( $0^{++}$ ), eksensel vektor ( $1^{++}$ ) ve ( $1^+$ ), tensor ( $2^{++}$ ).

örn:  $1^1S_0(0^+) \rightarrow K$ -mezon



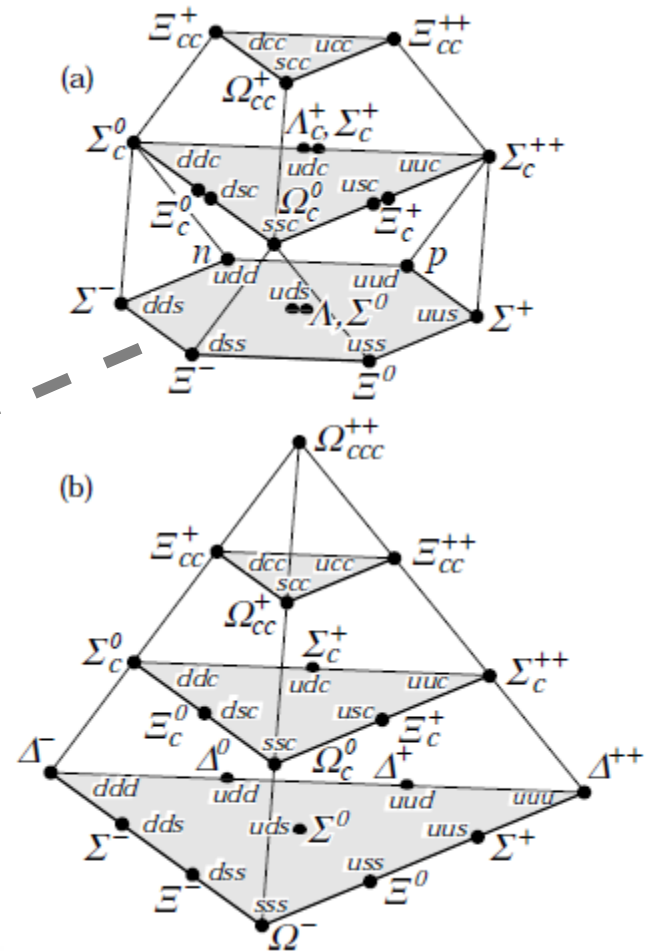
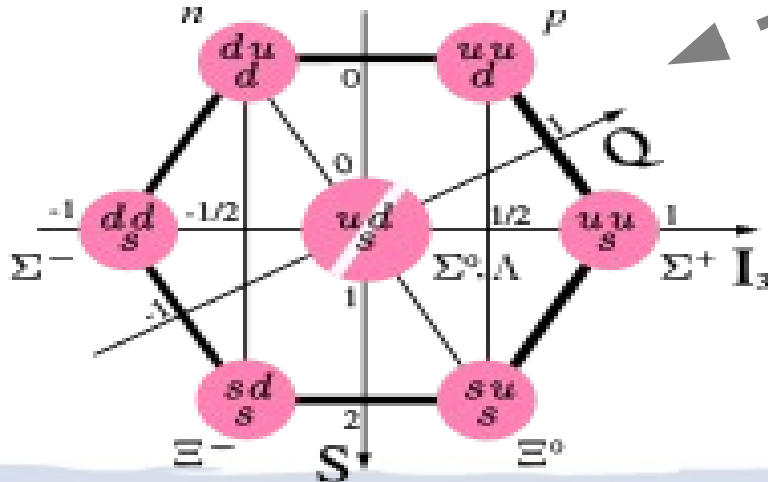


# Baryonlar

Baryonlar, renk birliği durumlar, baryon sayısı  $B=1$  taşıyan fermiyonlardır.

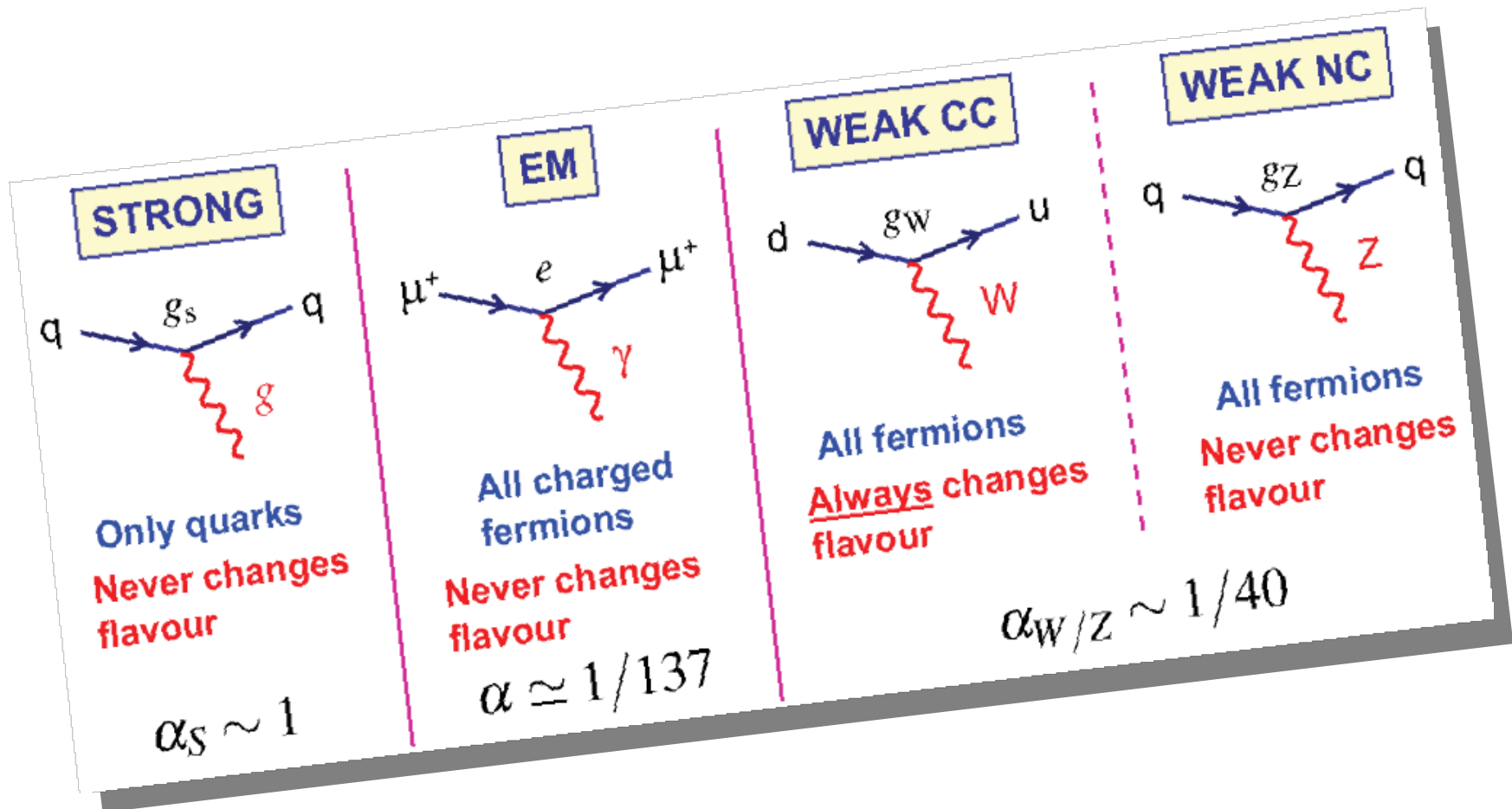
$$|qqq\rangle_A = |\text{color}\rangle_A \times |\text{space, spin, flavor}\rangle_S$$

Baryonları, aynı uyarılma kuantum sayısına göre bandlar üstünde sınıflandırmak kullanışlıdır.



# Etkileşmeler

Ayar bozonlarının fermiyonlarla etkileşmeleri köşeler ile tanımlanır. Ayar bozonlarının tipi ve etkileşmenin doğası etkileşmenin özelliklerini belirler.



# Etkileşme Lagrangian'ı → Köşe Faktörleri

- **QED etkileşme terimi**
- **QCD etkileşme terimi**

$$L_{QED, \bar{\psi}\psi A} = -g_e q \bar{\psi} \gamma^\mu \psi A_\mu$$

burada 3 alan – gelen fermiyon – giden fermiyon – foton ( $\psi, \bar{\psi}, A$ ) bir noktada etkileşir, ve etkileşme köşesi tanımlanır. Alanlara göre türetildiğinde kalan kısım köşe faktörünü verir

$$-ig_e q \gamma^\mu .$$

$$L_{QCD, \bar{\psi}\psi g} = -g_s \bar{\psi} \gamma^\mu \frac{\lambda^a}{2} \psi G_\mu^a$$

gelen kuark – giden kuark - gluon ( $q, \bar{q}, g$ ) bir noktada etkileşir, köşe faktörü

$$-ig_s \lambda/2 \gamma^\mu .$$

# Feynman Kuralları

- Serbest Lagrangian  
→ propagator

$$\frac{i}{p^2 - m^2} \quad (\text{spin} - 0)$$

$$\frac{i(\not{p} + m)}{p^2 - m^2} \quad (\text{spin} - 1/2)$$

$$\frac{-i}{p^2 - m^2} \left[ g_{\mu\nu} - \frac{p_\mu p_\nu}{m^2} \right] \quad (\text{spin} - 1)$$

- Etkileşme terimleri  
→ köşe faktörleri

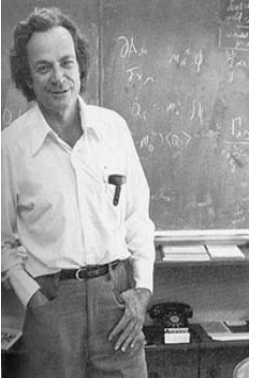
$$-ig_e q \gamma^\mu \quad (\text{QED})$$

$$\frac{-ig_s}{2} \lambda^a \gamma^\mu \quad (\text{QCD})$$

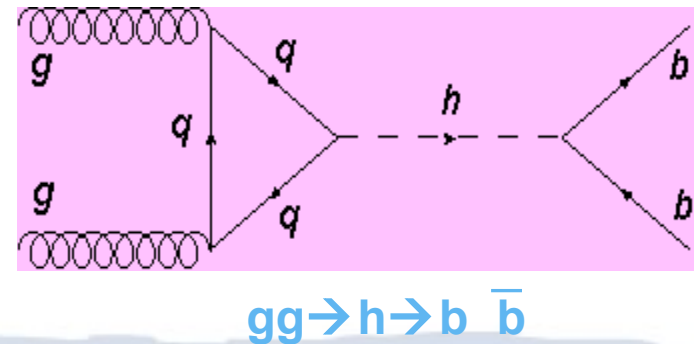
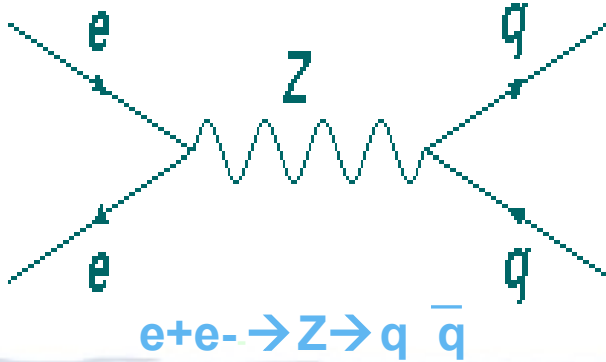
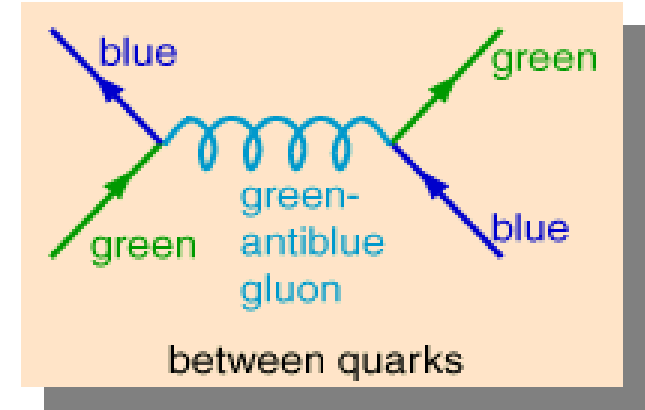
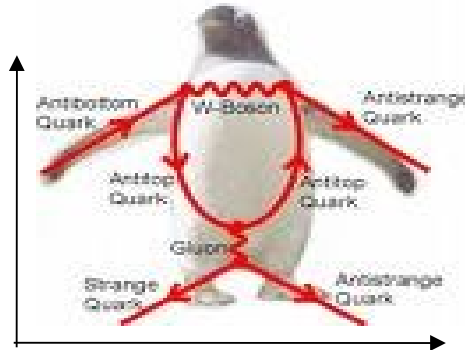
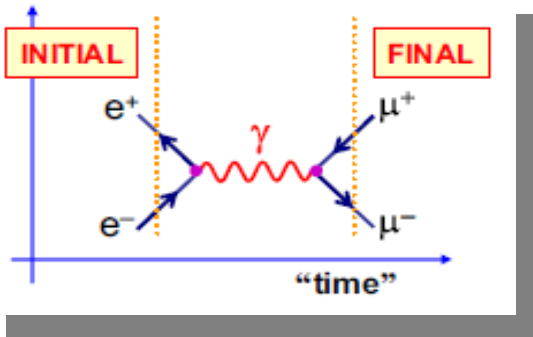
$$\frac{-ig_w}{2\sqrt{2}} \gamma^\mu (1 - \gamma^5) V_{ij} \quad (\text{EW/W})$$

$$\frac{-ig_z}{2} \gamma^\mu (c_V^f - c_A^f \gamma^5) \quad (\text{EW/Z})$$

# Feynman Diyagramları

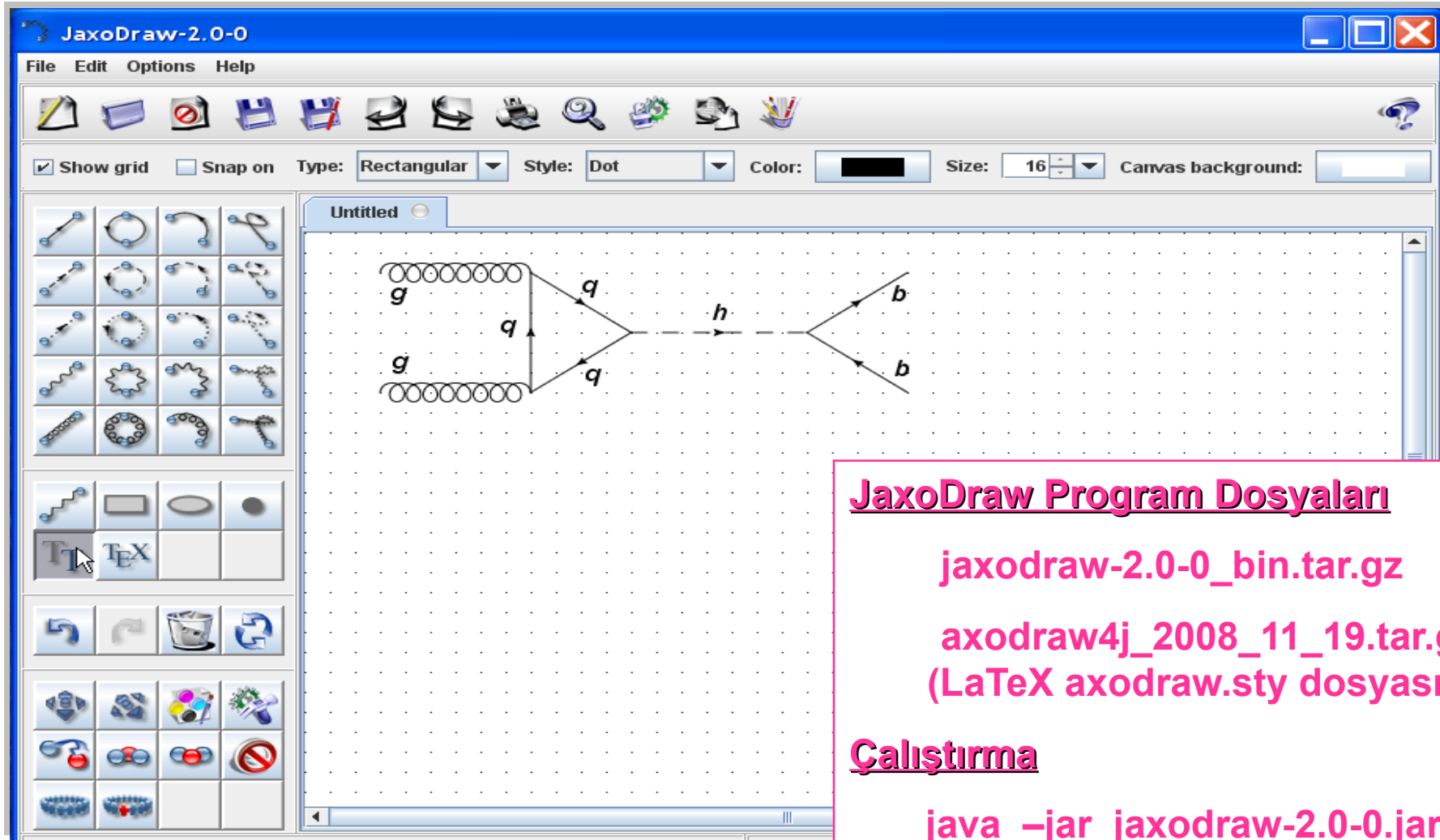


Yüksek enerji fiziği süreçleri genelde karmaşıktır, bunlar ışımalar, halkalar, vb. yapılar içerir. Bununla birlikte, LO süreçler temel parçacıklar (leptonlar, kuarklar ve ayar bozonları) arasındaki etkileşimlere ilk yaklaşım (en düşük merteye) olarak düşünülebilir. Feynman diyagramları parçacık fiziği süreçlerinin grafiksel gösterimidir.



# Uygulama: FD – JaxoDraw\*

\*JaxoDraw2.0, <http://jaxodraw.sourceforge.net/>



**JaxoDraw Program Dosyaları**

`jaxodraw-2.0-0_bin.tar.gz`

`axodraw4j_2008_11_19.tar.gz`  
(LaTeX axodraw.sty dosyası)

**Çalıştırma**

`java -jar jaxodraw-2.0-0.jar`

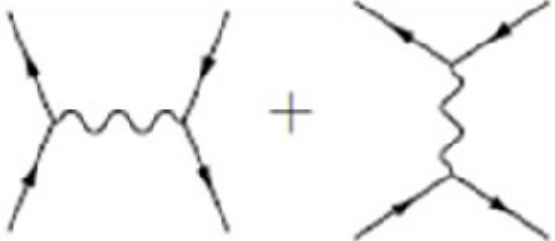
# Fermiyonların Electrozayıf Etkileşmeleri

Lagrangian for fermion fields after the symmetry breaking

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_F = & \sum_i \bar{\psi}_i \left( i \not{\partial} - m_i - \frac{gm_i H}{2M_W} \right) \psi_i \\ & - \frac{g}{2\sqrt{2}} \sum_i \bar{\psi}_i \gamma^\mu (1 - \gamma^5) (T^+ W_\mu^+ + T^- W_\mu^-) \psi_i \\ & - e \sum_i q_i \bar{\psi}_i \gamma^\mu \psi_i A_\mu \\ & - \frac{g}{2 \cos \theta_W} \sum_i \bar{\psi}_i \gamma^\mu (g_V^i - g_A^i \gamma^5) \psi_i Z_\mu . \end{aligned}$$

**SM**

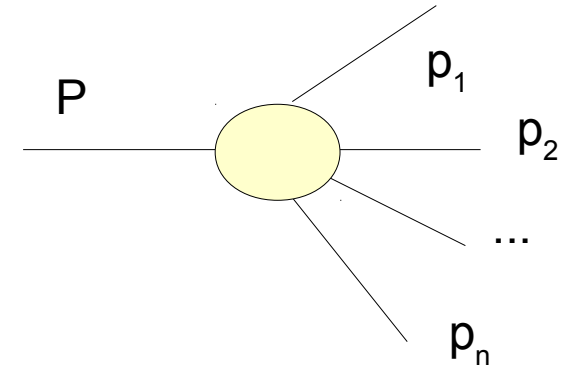
Belli bir süreç için genlik ve diferensiyel tesir kesitinin diyagramlarla gösterimi

Amplitude = 

$\frac{d\sigma}{d\Omega} \propto \left| \text{[Two Feynman diagrams for fermion-fermion scattering via a photon]} \right|^2$

# Parçacık Bozunumları

$M$  kütleli bir parçacığın durgun çerçevesinde  $n$  cisime bozunması oranı



$$d\Gamma = \frac{(2\pi)^4}{2M} |M_{fi}|^2 d\Phi_n(P; p_1, p_2, \dots, p_n)$$

ile verilir, burada çok-parçacık faz uzayı elemanı

$$d\Phi_n(P; p_1, p_2, \dots, p_n) = \delta^4(P - \sum_{i=1}^n p_i) \prod_{i=1}^n \frac{d^3 p_i}{(2\pi)^3 2E_i}$$

$M_{fi}$  ilk durumdan son duruma geçişte sürece özgü olan Lorentz değişmezi genliktir.



# Etkileşme Tesir Kesiti

Diferensiyel tesir kesiti aşağıdaki gibi yazılabilir

$$d\sigma = \frac{(2\pi)^4}{4\sqrt{(p_1 \cdot p_2)^2 - m_1^2 m_2^2}} |M_{fi}|^2 d\Phi_n(p_1 + p_2; p_3, p_4, \dots, p_{n+2})$$

Kütle merkezi çerçevesinde

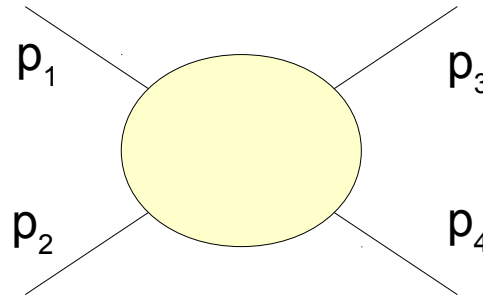
$$\sqrt{(p_1 \cdot p_2)^2 - m_1^2 m_2^2} = p_{1\text{cm}} \sqrt{s}$$

Mandelstam değişkenlerini kullanmak faydalıdır.

$$s = (p_1 + p_2)^2 = (p_3 + p_4)^2 \\ = m_1^2 + m_2^2 + 2E_1 E_2 - 2\vec{p}_1 \cdot \vec{p}_2$$

$$t = (p_1 - p_3)^2 = (p_2 - p_4)^2 \\ = m_1^2 + m_3^2 - 2E_1 E_3 - \vec{p}_1 \cdot \vec{p}_3$$

$$u = (p_1 - p_4)^2 = (p_2 - p_3)^2 \\ = m_1^2 + m_4^2 - 2E_1 E_4 + 2\vec{p}_1 \cdot \vec{p}_4$$

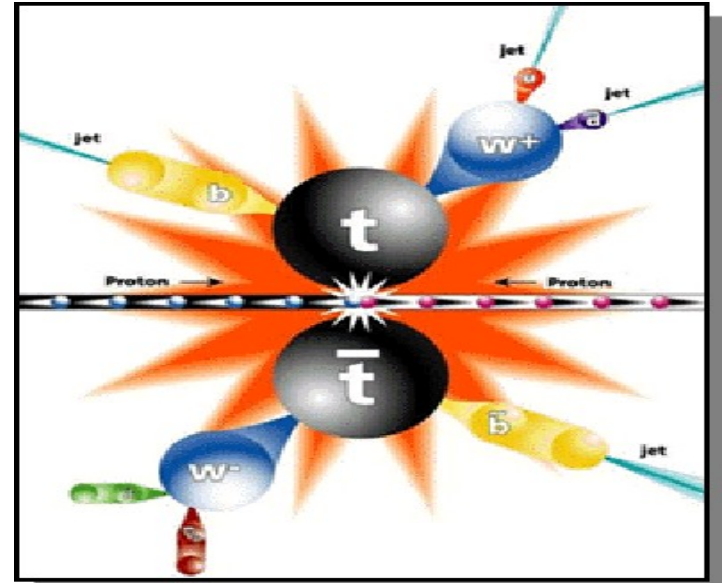
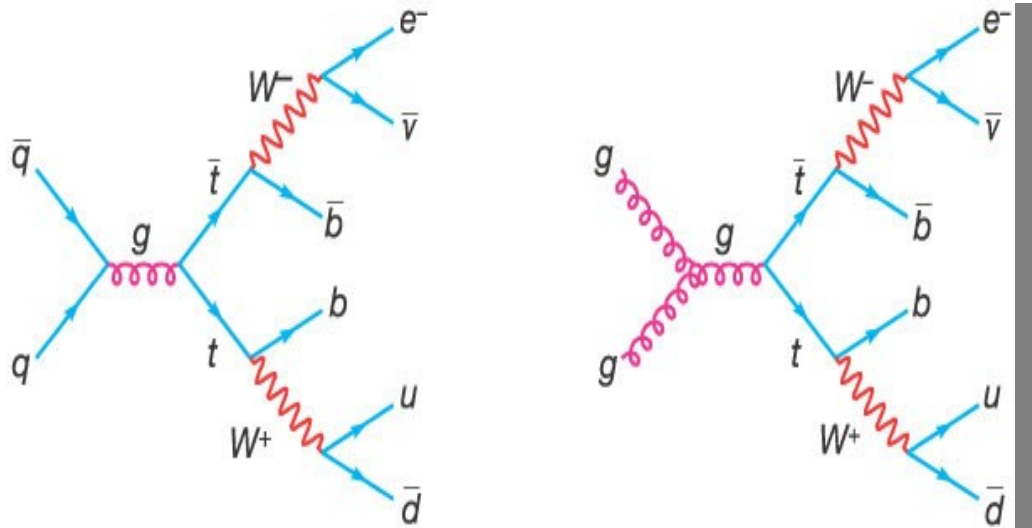


• iki-cisim  
saçılma tesir  
kesiti

$$\frac{d\sigma}{dt} = \frac{1}{64\pi s} \frac{|M|^2}{|p_{1\text{cm}}^{\vec{}}|^2} \quad 33$$

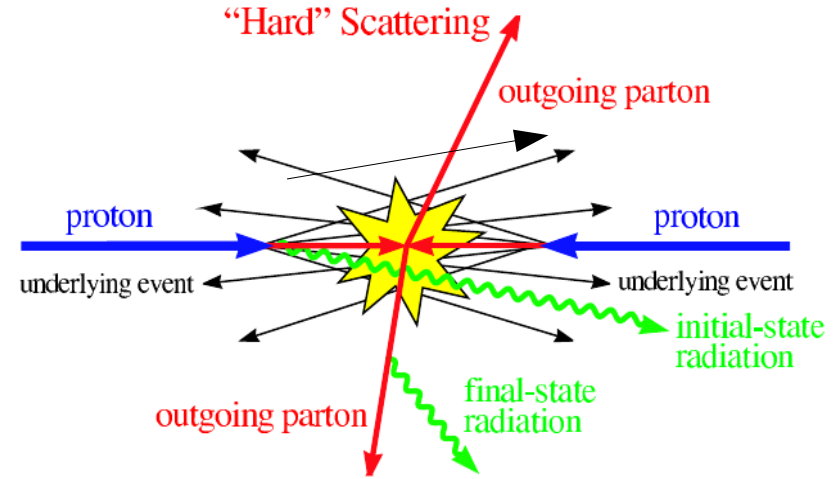
## Çarpıştırıcılarda Çift Üretim

Çarpıştırıcılarda, madde ve kuvvetler çalışılabilir. Hatta çarpışan parçacıkların enerjisi kütleyle dönüştürülerek kuvvetler aracılığıyla yeni ve ağır madde üretilebilir. Şekilde hadron çarpıştırıcılarında üst kuarkın çift üretim ( $t$  ve  $t\bar{t}$ ) süreci görülmektedir. Birinci diyagramla üretim Tevatron'da baskın iken, ikinci diyagramla üretim LHC'de baskındır.



# Enine Kayıp Enerji

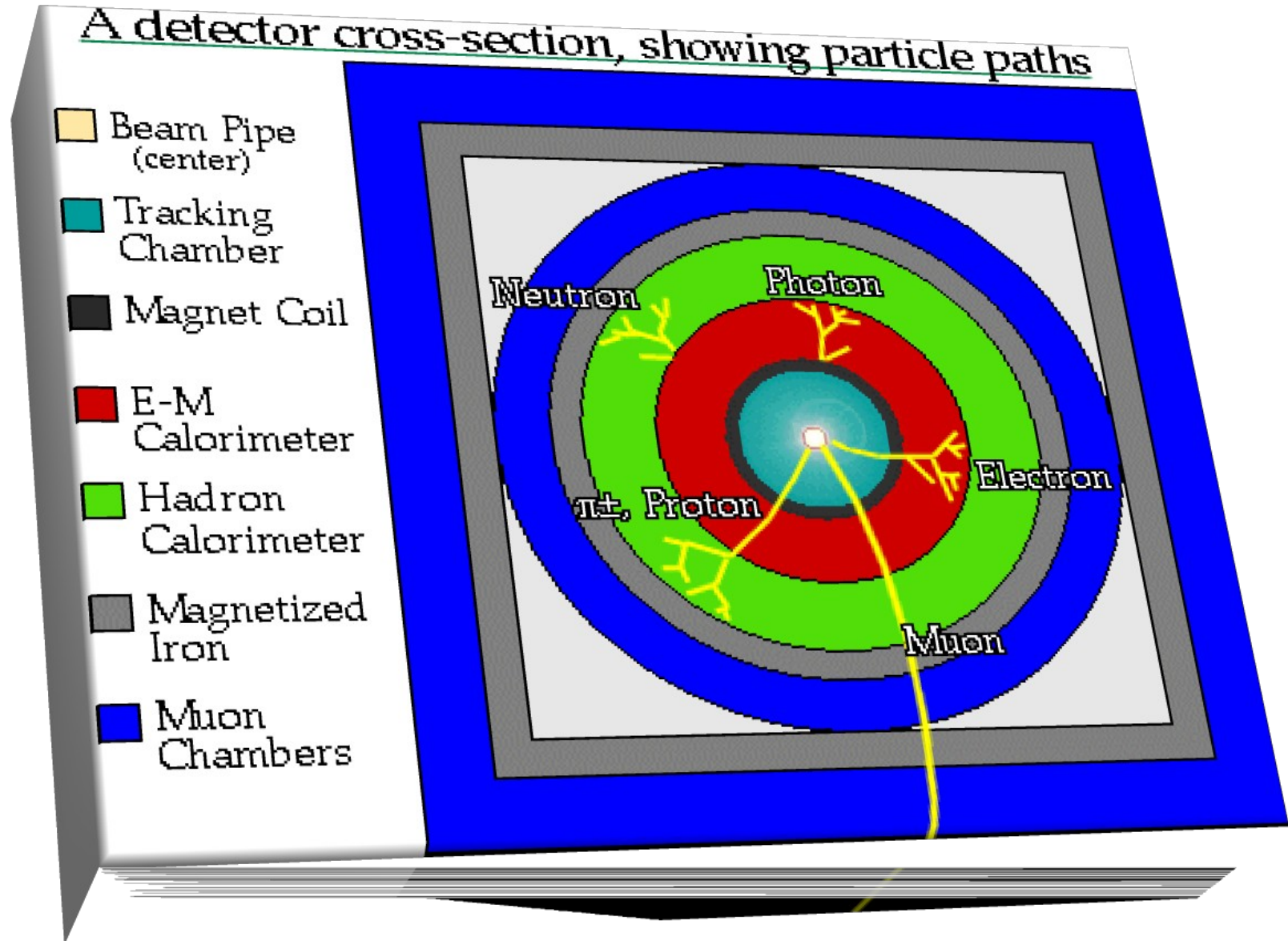
- Gelen hadron enerjisinin önemli bir kısmı demet borusuna gider. Doğrudan algılanamayan parçacıklar (nötrinolar) için, demet doğrultusuna dik düzlemde enine momentum bileşeni hesaplanabilir.



$$E_T^{\text{miss}} = - \sum_i p_T(i)$$

\* Son durumdaki algılanabilen parçacıkların enine momentumlarının toplamı – MET verir.

# Parçacıkların Dedektörde Algılanması



# Standart Model (SM)

Standart modelin ayar grubu  $SU(3)_C \times SU(2)_W \times U(1)_Y$ , burada  $C$  renk,  $W$  zayıf izospin, ve  $Y$  hiperyüktür. Karşılık gelen ayar alanları  $G_m^a (a=1,8)$ ,  $W_m^i (i=1,3)$  ve  $B_m$  ile gösterilir.

\* Bu simetri kırılmaktadır  
-->  **$SU(3)_C \times U(1)_{em}$** .

\* Kuvvet: 3 farklı etkileşmeye karşı gelen vektör bozonları, 1 foton (EM), 8 gluon (QCD), 3  $W^\pm/Z$  bozonu bulunmaktadır.

\* Madde: üç fermiyon ailesinde, 3 yüklü lepton ve karşılık gelen nötrinolar, 6 çeşit kuark gözlenmiştir.

\* Higgs: alanın önemli bir rolü vardır,

- bir Higgs ikilisi diğer alanlarla etkileşir
- boşluk beklenen değeri kazanır ( $\sim 246$  GeV)
- kuarklar, leptonlar ve  $W/Z$  bozonları, ayrıca Higgs bozonunun kendisi de bu mekanizma ile kütle kazanır.<sup>37</sup>

# Parçacıkların Kuantum Sayıları

- **Temel parçacıkların kuantum sayıları SU(3) X SU(2) X U(1) grup yapısına göre belirlenir.**

$L_L$ $E_R$	$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix}_L, \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu^- \end{pmatrix}_L, \begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau^- \end{pmatrix}_L$ $e_R^-, \mu_R^-, \tau_R^-$	$(1,2,-1)$ $(1,1,-2)$
$Q_L$ $U_R$ $D_R$	$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}_L, \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}_L, \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}_L$ $u_R, c_R, t_R$ $d_R, s_R, b_R$	$(3,2,+1/3)$ $(3,1,+4/3)$ $(3,1,-2/3)$

- **Lagrangian:**

- **Ayar etkileşmeleri**

- **Madde fermiyonları**

- **Yukawa etkileşmeleri**

- **Higgs potansiyeli**

$$\begin{aligned} \mathcal{L} = & -\frac{1}{4} F_{\mu\nu}^a F^{a\ \mu\nu} \\ & + i\bar{\psi} \not{D}\psi + h.c. \\ & + \psi_i y_{ij} \psi_j \phi + h.c. \\ & + |D_\mu \phi|^2 - V(\phi) \end{aligned}$$

# Alan Teorileri

- **Klasik mekanikte**

Lagrangian konum, hız ve zamanın fonksiyonudur  $L(q, \dot{q}, t)$ , kinetik ve potansiyel enerji cinsinden  $L=T-V$ . Hareket denklemi

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial L}{\partial q} = 0$$

böylece Lagrangian'da açıkça bulunmayan koordinata karşı gelen eşlenik momentum korunur.

→ Newton yasaları

- **alan teori** 'de bir alan fonksiyonu  $\phi(x, y, z, t)$  ile çalışırız. Görelî teoride (4D uzay-zaman) Euler-Lagrange denklemi

$$\frac{\partial}{\partial x^\mu} \left( \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial (\partial \phi / \partial x^\mu)} \right) - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \phi} = 0$$

→ **spin-0**: Klein-Gordon denklemi;  
**spin-1/2**: Dirac denklemi; **spin-1**: Proca denklemi.

# Global ve Yerel Faz Dönüşümleri

Serbest Dirac lagrangian'ı

$$L = i\bar{\psi}\gamma^\mu\partial_\mu\psi - m\bar{\psi}\psi$$

## Global faz dönüşümü

$$\psi(x) \rightarrow e^{-iq\alpha}\psi(x)$$

- Dirac lagrangian'ı bu dönüşüm altında değişmez kalır.
- Dalga fonksiyonunun mutlak fazı ölçülebilir değildir (keyfi kalır).
- Girişimdeki bağıl fazlar bu faz dönüşümünden etkilenmezler.
- Simmetri-->yük korunumu

## Yerel faz dönüşümü

$$\psi(x) \rightarrow e^{-iq\alpha(x)}\psi(x)$$

Dalga fonksiyonunun türevi

$$\partial_\mu[e^{-iq\alpha(x)}\psi(x)] \rightarrow e^{-iq\alpha(x)}[\partial_\mu\psi(x) - iq(\partial_\mu\alpha(x))\psi(x)]$$

ek bir terime yol açar  $iq\partial_\mu\alpha(x)$

Bu durumda Lagrangian

$$L \rightarrow L + q\bar{\psi}\gamma^\mu\psi(\partial_\mu\alpha(x))$$

- Toplam Lagrangian bu dönüşüm altında değişmez kalmalı, böylece serbest Dirac Lagrangian'ında ayar bozonunun hem kinetik hem de etkileşme terimini bulundurmalıyız.

**Bu işlem etkileşmenin ayar bozonunu otomatik olarak ortaya çıkarır.**



# U(1) Ayar Simetrisi

Elektromagnetik Lagrangian yerel U(1) ayar dönüşümü altında değişmez kalır.

$$L = i\bar{\psi}\gamma^\mu\partial_\mu\psi - m\bar{\psi}\psi - \frac{1}{4}F^{\mu\nu}F_{\mu\nu} - q\bar{\psi}\gamma^\mu\psi A_\mu$$

burada vektör alanı dönüşümü ve kovaryant türev aşağıdaki gibidir

$$A_\mu \rightarrow A_\mu + \partial_\mu\alpha(x)$$

$$F^{\mu\nu} = \partial^\mu A^\nu - \partial^\nu A^\mu$$

$$D_\mu = \partial_\mu + iqA_\mu$$

Etkileşmenin tipi yerel ayar dönüşümünden elde edilir, Kuantum elektrodinamiği U(1) faz simetrisine uyan bir ayar teorisidir.

# QED Lagrangian

$$\mathcal{L} = i\bar{\psi}\gamma^\mu \partial_\mu \psi - e\bar{\psi}\gamma^\mu A_\mu \psi - m\bar{\psi}\psi - \frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu}$$

# Yang-Mills Teori

Yang ve Mills yerel simetriyi abelyen-olmayan duruma genişletmişlerdir. Dönüşüm matrisinin ( $S$ ) determinanı +1 dir. Lagrangian  $SU(2)$  global faz dönüşümü altında değişmez kalır. Yerel dönüşüm için ek terimler gelecektir, bunları yok etmek için ek alan ve etkileşme terimi eklemeliyiz.

$$\psi \rightarrow S\psi, \quad S = e^{-iq\tau \cdot \lambda(x)}$$

Kovaryant türev aşağıdaki gibi yazılabilir

$$D_\mu = \partial_\mu + iq\tau \cdot A_\mu \quad \partial_\mu \psi \rightarrow S(\partial_\mu \psi) + (\partial_\mu S)\psi$$

skaler çarpım ise aşağıdaki gibi dönüşür

$$\tau \cdot A'_\mu = S(\tau \cdot A'_\mu)S^{-1} + (i/q)(\partial_\mu S)S^{-1}$$

Böylece, yerel  $SU(2)$  ayar dönüşümü altında değişmez kalan Lagrangian

$$L = i\bar{\psi}\gamma^\mu \partial_\mu \psi - m\bar{\psi}\psi - \frac{1}{4}F^{\mu\nu} \cdot F_{\mu\nu} - (q\bar{\psi}\gamma^\mu \tau \psi) \cdot A_\mu$$

## Kendiliğinden Simetri Kırılması

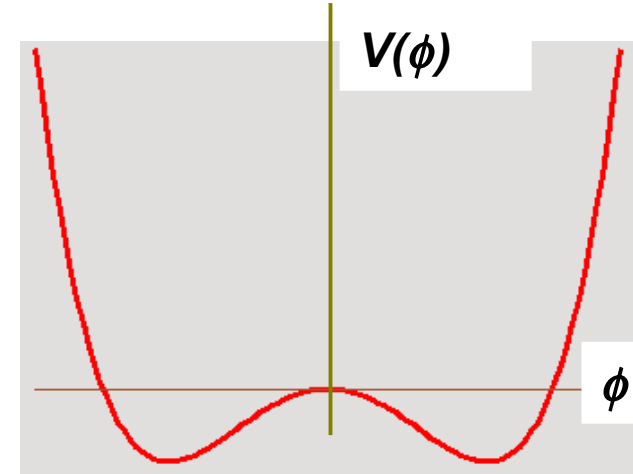
- Skaler alan için Lagrangian

$$L = \frac{1}{2}(\partial^\mu\phi)(\partial_\mu\phi) + \frac{1}{2}\mu^2\phi^2 - \frac{1}{4}\lambda^2\phi^4$$

burada  $\phi \rightarrow -\phi$  için, Lagrangian değişmez kalır. Potansiyel  $\phi = \pm\mu/\lambda$  için minimumlara sahiptir. Yeni bir değişken  $\eta = \phi \pm \mu/\lambda$  bu minimumdan bir sapma cinsinden ifade edilebilir, bu durumda Lagrangian

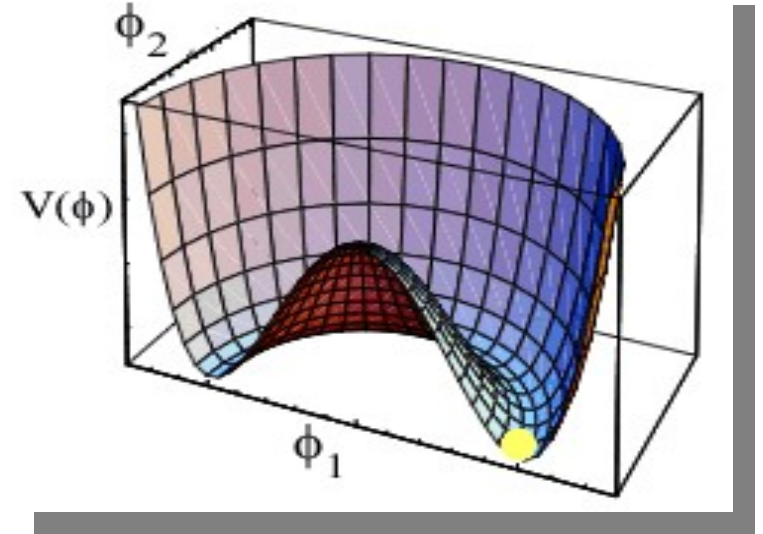
$$L = \frac{1}{2}(\partial^\mu\eta)(\partial_\mu\eta) - \mu^2\eta^2 \pm \mu\lambda\eta^3 - \frac{1}{4}\lambda^2\eta^4 + \frac{1}{4}(\mu^2/\lambda)^2$$

- Yeni Lagrangian artık  $\eta \rightarrow -\eta$  için simetrik değildir, simetri kendiliğinden kırılmıştır (SSB).



# Kırılan Simetri

- Bazı simetriler tam değildir, yani kırılırlar! Çok önemli bir özellik!



- Kendiliğinden simetri kırılması yoluyla fermiyonların ve kütleli ayar bozonlarının kütleleri için bir formülasyon elde edilir.
  - Bir başka kütleli parçacık daha tahmin edilir (ancak henüz gözlenmemiştir!): Higgs bozonu, kütle kazanmadan sorumlu – Standart model'in yeni keşfedilmiş ve istenen parçacığı.

# Higgs Mekanizması

- Kompleks alan

$$\phi = \phi_1 + i\phi_2$$

ve skaler alan Lagrangian'ı

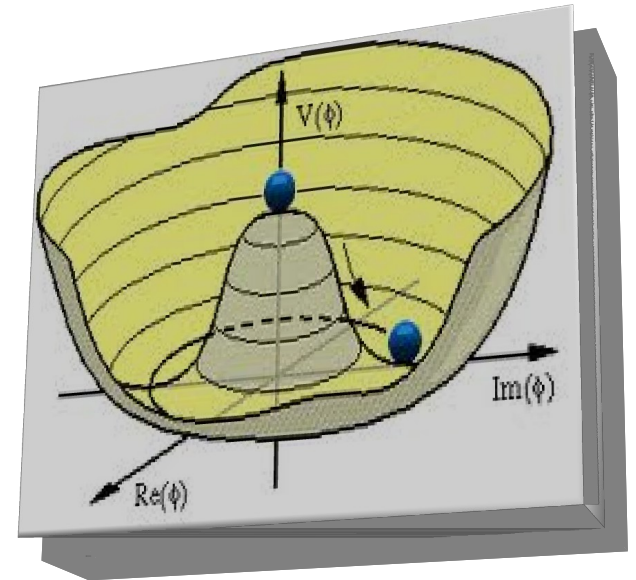
$$L = \frac{1}{2}(\partial^\mu \phi)(\partial_\mu \phi)^* + \frac{1}{2}\mu^2(\phi\phi^*) - \frac{1}{4}\lambda^2(\phi\phi^*)^2$$

bu Lagrangian'ın yerel dönüşüm altında değişmez kalmasını istiyoruz, sistemin minimum enerji durumunda bulunacağı bir dönüşüm yapabiliriz

$$L(\phi_1, \phi_2, A) \rightarrow L'(\phi'_1, \phi'_2, A')$$

*SSB öncesi*

*SSB sonrası*



*burada  $\phi'_1 = \phi_1$  seçimi ve  $\phi'_2 = \phi_1 - \mu/\lambda$  ile kütsüz Goldstone bozonu alanı  $\phi'_1$  yok olur ve  $A'$  bozonuna kütle kazandırır.  $\phi'_2$  alanı ise (Higgs bozonu) bir kütleyle sahiptir.*

# Ayar Bozonu Kütleleri

Ayar bozonu kütle ifadeleri  $|D_\mu \phi|^2$  teriminden elde edilir. Burada kovaryant türev

$$D_\mu \phi = \left[ \partial_\mu - ig \frac{\sigma^i}{2} W_\mu^i - ig' \frac{Y}{2} B_\mu \right] \phi \quad \text{skaler alan}$$

$$\phi = U(x) \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 \\ v + h(x) \end{pmatrix}$$

ve ayar alanı kütle öz durumları

$$W_\mu^\pm = \frac{W_\mu^1 \mp iW_\mu^2}{\sqrt{2}}, \quad Z_\mu = W_\mu^3 \cos \theta_W - B_\mu \sin \theta_W, \quad A_\mu = W_\mu^3 \sin \theta_W + B_\mu \cos \theta_W$$

$$\rightarrow \frac{1}{4} g^2 v^2 W_\mu^+ W^{\mu-} + \frac{1}{8} v^2 (gW_\mu^3 - g'B_\mu)^2 \quad m_W = gv/2, \quad m_Z = m_W / \cos \theta_W$$

# Fermiyon kütleleri

Fermiyon kütleleri sol-el fermiyon ( $f_L$ ) ve sağ-el fermiyonun ( $f_R$ ) skaler alan ( $\phi$ ) ile etkileşmesinden elde edilir,

$$\begin{aligned} L_Y &= -y_f (\bar{f}_R \phi^\dagger f_L - \bar{f}_L \phi f_R) = -\frac{y_f(v+h)}{\sqrt{2}} (\bar{f}_R f_L + \bar{f}_L f_R) \\ &= -\frac{y_f}{\sqrt{2}} (v+h) \bar{f} f \rightarrow -m_f \bar{f} f - \frac{g m_f}{2m_W} h \bar{f} f \end{aligned}$$

fermion kütleleri Yukawa bağlaşımı ve vakum beklenen değerinden ( $v=246$  GeV) elde edilir

$$m_f = y_f v / \sqrt{2}$$

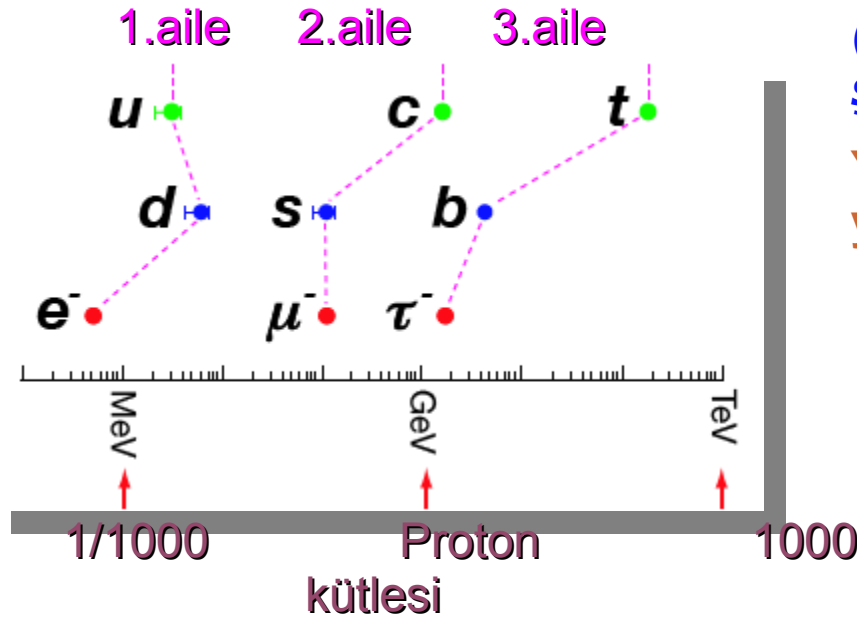
üst kuark için,  
 $y_t = \sqrt{2} m_t / v \approx 1.$

**Nötrino kütleleri ve karışımlarının açıklanması için SM ötesine gitme ihtiyacı var!**



# Çeşni Problemi

- Kütle hiyerarşisi



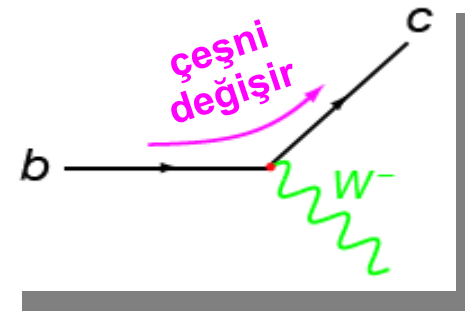
**Hadronları oluşturan ağır kuarklar**

**b ve c kuarklarıdır. Bu hadronlar (mezonlar / baryonlar) etkin bir şekilde algılanabilir.**

**Yüklü zayıf akım çeşni karışımına yol açar.**

	d	s	b
u	■	■	■
c	■	■	■
t	■	■	■

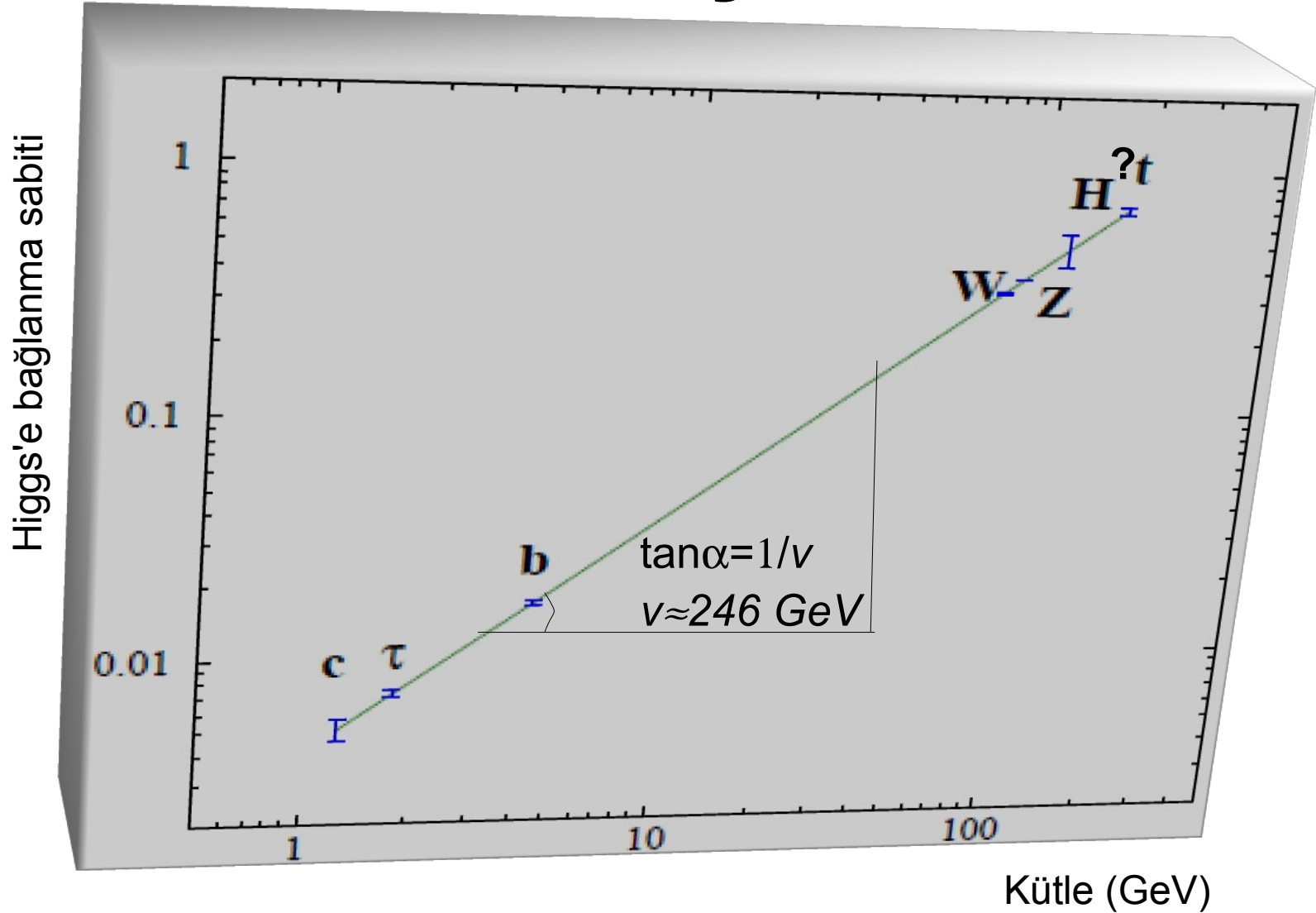
**Electro-zayıf simetri kırılması parçacıkların nasıl kütle kazanacağını açıklayabilir, fakat kütlelerin değerinin ne olduğunu açıklamaz.**



# Fermiyon Kütleleri ve Çeşni Fizikî Ölçeği

<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>m_u \approx 3 \text{ MeV}</math></li> <li>• <math>m_d \approx 5 \text{ MeV}</math></li> <li>• <math>m_s \approx 100 \text{ MeV}</math></li> <li>• <math>m_c \approx 1270 \text{ MeV}</math></li> </ul>	<b>Hafif kuarklar (<math>m \leq \Lambda_{\text{QCD}}</math>)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>m_{\nu_1} \leq 10^{-6} \text{ MeV}</math></li> <li>• <math>m_{\nu_2} \leq 10^{-5} \text{ MeV}</math></li> <li>• <math>m_{\nu_3} \leq 10^{-4} \text{ MeV}</math></li> </ul>	<b>Nötrinolar (Nötrino-feno)</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>m_b \approx 4200 \text{ MeV}</math></li> <li>• <math>m_t \approx 172000 \text{ MeV}</math></li> </ul>	<b>Çok ağır kuark</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>M_e \approx 0.5 \text{ MeV}</math></li> <li>• <math>m_\mu \approx 100 \text{ MeV}</math></li> <li>• <math>m_\tau \approx 1800 \text{ MeV}</math></li> </ul>	<b>Hafif leptonlar (EDM/MDM)</b>
			<b>Tau lepton</b>

# Higgs'e bağlanma sabiti ile kütle ilişkisi



# SM'de CP Bozulması

Lagrangian terimleri içinde kompleks bağlaşım sabitleri CP kaynaklarıdır,

$$\mathcal{L} = \sum_i a_i \mathcal{O}_i + h.c. \quad (CP) \mathcal{O}_i (CP)^\dagger = \mathcal{O}_i^\dagger$$

Yüklü akım bağlaşımları dışında, kütle bazında SM'nin bütün bağlaşımları gerçel yapılabilir. Önemli bir özellik

$$V_{CKM} \neq V_{CKM}^*$$

SM'de karışım matrisindeki 1 faz, zayıf etkileşmelerdeki CP bozulmasından sorumludur.

# Kuarklar için Karışım Parametreleri

Sol-el  $u_L$  ve  $d_L$  kuarkları ile bağlaşımı olan yüklü akım  $W^{+/-}$  etkileşmeleri için karışım matrisi

$$V_{CKM} \equiv V_L^{uV} V_L^{dI} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix}$$

Parametrelerin standart seçimi

$$V = \begin{pmatrix} c_{12}c_{13} & s_{12}c_{13} & s_{13}e^{-i\delta} \\ -s_{12}c_{23} - c_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{12}c_{23} - s_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & s_{23}c_{13} \\ s_{12}s_{23} - c_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & -c_{12}s_{23} - s_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{23}c_{13} \end{pmatrix}$$

Elemanların büyüklükleri:  $|V_{ud}| \approx 0.97425$ ,  $|V_{us}| \approx 0.2252$ ,  $|V_{ub}| \approx 0.00389$ ,  
 $|V_{cd}| \approx 0.230$ ,  $|V_{cs}| \approx 1.023$ ,  $|V_{cb}| \approx 0.0406$ ,  $|V_{td}| \approx 0.0084$ ,  $|V_{ts}| \approx 0.0387$ ,  
 $|V_{tb}| \approx 0.88$ .

# Nötrinolar

1970'lerde formüle edilen SM'de nötrinolar kütlelessiz varsayılmıştı, bu durumda nötrinolar için sadece bir helisite durumu vardır (sol-el). 1960'larda Pontecorvo, Maki, Nakagaya ve Sakata (PMNS) nötrinoların, süreçlerde çeşni öz durumlarında  $(\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau)$  üretilip yok olabileceğini, ve kütle öz durumları  $(\nu_1, \nu_2, \nu_3)$  uzayında hareket edebileceğini önermişlerdir.

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{11} & U_{12} & U_{13} \\ U_{21} & U_{22} & U_{23} \\ U_{31} & U_{32} & U_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

# Nötrino Karışımı

Muon nötrinosu ( $\nu_\mu$ ) ve tau nötrinosunun ( $\nu_\tau$ ) karışımı  $\nu_2$  ve  $\nu_3$  (atmosferik nötrinolar) cinsinden yazılabilir, burada  $\theta$  karışım açısıdır. Dalga genlikleri

$$\nu_\mu = \nu_2 \cos \theta + \nu_3 \sin \theta$$

$$\nu_\tau = -\nu_2 \sin \theta + \nu_3 \cos \theta$$

Nötrino enerjisi  $E_i$  olmak üzere, kütle özdeğerleri zamana bağlıdır

$$\nu_2(t) = \nu_2(0) \exp(-i E_2 t)$$

$$\nu_3(t) = \nu_3(0) \exp(-i E_3 t)$$

# Nötrino Karışımı - 2

İlk durumda muon nötrinoları ile başlarsak

$$\nu_2(0) = \nu_\mu(0) \cos \theta$$

$$\nu_3(0) = \nu_\mu(0) \sin \theta$$

zamana bağlılık  $\nu_\mu(t) = \nu_2(t) \cos \theta + \nu_3(t) \sin \theta$

ve genlik

$$A_\mu(t) = \nu_\mu(t) / \nu_\mu(0) = \cos^2 \theta \exp(-iE_2 t) + \sin^2 \theta \exp(-iE_3 t)$$

Yoğunluk/şiddet fonksiyonu

$$I_\mu(t) / I_\mu(0) = 1 - \sin^2 2\theta \sin^2[(E_3 - E_2)t/2]$$



# Nötrino Kütleleri

Nötrinolar **Dirac parçacıkları** ise:

- nötrino ve anti-nötrino ayrı parçacıklardır
- sol-el durum ve kütesiz

Nötrinolar **Majorana parçacıkları** ise:

- Parçacık ve anti-parçacık aynıdır  $\nu = \nu^c$ .

Genelde, **lepton kütleleri** hem Dirac hem de Majorana kütle terimlerinden kaynaklanır.

$$\begin{pmatrix} m_L & m_D \\ m_D & m_R \end{pmatrix}$$

\* Burada  $m_L$  ve  $m_R$ , sırasıyla sol-el ve sağ-el durumlar için Majorana kütleleridir.  $m_D$  Dirac kütlelerini gösterir.

# Nötrino Kütleleri - 2

- Kütle matrisini köşegenleştirebiliriz, bu durumda özdeğerler

$$m_{1,2} = [ (m_R + m_L) \pm \sqrt{(m_R - m_L)^2 + 4 m_D^2} ] / 2$$

burada  $m_L$  çok küçük olduğu varsayılır; ve  $m_R = M$  ise Dirac ölçeğinden çok daha büyüktür (GUT ölçeği civarında). Fiziksel nötrino kütlesi aşağıdaki gibi yazılabilir

$$m_1 \approx \frac{m_D^2}{M}, \quad m_2 \approx M$$

Bu mekanizma (see-saw) ile, sağ-el nötrino kütlesi çok büyük, sol-el Majorana nötrino kütlesi çok küçük alınabilir.

# CP ve BAU

- Evrendeki baryon asimetrisi (BAU) KM CP durumundan hesaplanabilir:

$$(n_B - n_{\bar{B}})/n_\gamma \approx n_B/n_\gamma \sim JP_u P_d / M^{12}$$

- Jarlskog parametresi ( $J \sim O(10^{-5})$ ) kuark sektöründe CP bozulmasının bir parametrizasyonudur.

- Electrozayıf ölçekte  $O(100 \text{ GeV})$  kütle parametresi, hesaplanan asimetri  $O(10^{-17})$ , gözlenen değer  $O(10^{-10})$  çok altındadır.
- Bu nedenle CP bozulması için daha fazla kaynağa ihtiyaç vardır!

$$J = \cos(\theta_{12}) \cos(\theta_{23}) \cos^2(\theta_{13}) \sin(\theta_{12}) \sin(\theta_{23}) \sin(\theta_{13}) \sin(\delta)$$

$$P_u = (m_t^2 - m_c^2)(m_t^2 - m_u^2)(m_c^2 - m_u^2)$$

$$P_d = (m_b^2 - m_s^2)(m_b^2 - m_d^2)(m_s^2 - m_d^2)$$

# Bazı Kaynaklar

- D. Griffiths, Introduction to Elementary Particles, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KgaA, 2008.
- C. Burgess and G. Moore, The Standard Model: A Primer, Cambridge University Press, 2007.
- J.F. Donoghue, E. Golowich, B.R. Holstein, Dynamics of the Standard Model, Cambridge University Press, 1996.
- P. Ramond, Journeys Beyond The Standard Model, Lightning Source Inc., 2003.

+

# Parçacık Fiziğinde Birimler

- S.I. Birimleri: kg, m, s “günlük” karşılaşılan cisimler için doğal bir seçimdir, fakat parçacık fiziği için oldukça büyük birimlerdir.
- Atom fizikçileri **electron volt (eV)** kullandılar – (eV) 1 volt potansiyel farkında hızlandırılan elektronun kinetik enerjisi:  $1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ joule}$ .
- Parçacık Fizikçileri **Doğal Birimleri** kullanmaktadır:
  - kuantum mekaniğinden – eylemin birimi:  $\hbar$
  - görelilikten – ışığın hızı:  $c$
  - parçacık fiziğinden – enerji birimi: **GeV**  
(proton durgun-kütle enerjisi  $\sim 938 \text{ MeV}/c^2 = 1.67 \times 10^{-24} \text{ g}$ )
- Bu derslerde **doğal birimler** kullanılacaktır.

# Parçacık Fizikinde Birimler - 2

- Birimler (boyutlu)
  - Enerji: GeV      Zaman:  $(\text{GeV}/\hbar)^{-1}$
  - Momentum: GeV/c      Uzunluk:  $(\text{GeV}/\hbar c)^{-1}$
  - Kütle:  $\text{GeV}/c^2$       Alan:  $(\text{GeV}/\hbar c)^{-2}$
- Dönüştürme işlemleri,  $\hbar=c=1$  yazarak basitleştirilebilir! Böylece, bütün fiziksel nicelikler GeV' in kuvvetleri cinsinden ifade edilir.
- S.I. birimlerine geri dönüştürme için,  $\hbar$  and  $c$  nin gerekli çarpanları kullanılır.
- Heaviside-Lorentz birimlerinde ise  $\hbar=c=\epsilon_0=\mu_0=1$  alınır, bu durumda Coulomb yasası
$$F = \frac{1}{4\pi} \frac{q^2}{r^2}$$
  - Elektrik yükü ( $q$ ) boyutu:  $(FL^2)^{1/2}=(EL)^{1/2}=(\hbar c)^{1/2}$

# Parçacık Fizikinde Birimler - 3

- Bazı birimlerin dönüşümü
  - Dönüştürme sabitleri,  $\hbar=c=1$  ve  $\hbar c=1$  ve  $(\hbar c)^2=1$  yazarak belirlenebilir:
  - $\hbar=1.054571726 \times 10^{-34} \text{ J.s} = 6.58211928 \times 10^{-22} \text{ MeV.s}$
  - $\hbar c = 197.3269718 \text{ MeV.fm}$
  - $(\hbar c)^2 = 0.389379338 \text{ GeV}^2.\text{mbarn}$
  - $k = 1.3806488 \times 10^{-23} \text{ J.K}^{-1} = 8.6173324 \times 10^{-5} \text{ eV.K}^{-1}$
- Diğer pratik birimler
  - $1 \text{ T} = 10^4 \text{ G}$  ;  $1 \text{ N} = 10^5 \text{ dyne}$  ;  $1 \text{ J} = 10^7 \text{ erg}$
  - $1 \text{ \AA} = 0.1 \text{ nm}$  ;  $1 \text{ barn} = 10^{-28} \text{ m}^2$
  - $1 \text{ C} \sim 2.9979 \times 10^9 \text{ esu}$  ;  $1 \text{ eV}/c^2 \sim 1.78 \times 10^{-36} \text{ kg}$
  - $1 \text{ çalışma yılı} \sim 10^7 \text{ s}$



+

# Ödevler

1) Temel fermiyonların kütlelerini ve hatalarını PDG12'dan alarak, Yukawa bağlaşımlarını - kütleye göre grafiğini çiziniz. Verilere bir eğri fit edildiğinde fit parametrelerini belirleyiniz ve sonucu yorumlayınız.

2) Drell-Yan süreci ile (s-kanalı) üst kuark çift üretiminde ileri-yön/geri-yön asimetrisinin hangi tür etkileşmeden kaynaklanacağını yazınız. Bu süreç için son durumda dedektörde nasıl sinyaller algılanabileceğini yazınız, bunların oranlarını yaklaşık olarak hesaplayınız.