

Ders I: Standart Model'e Giriş

Prof. Dr. Altuğ Özpineci

ODTÜ Fizik Bölümü

Kuantum Alan Kuramına Giriş – KEDİ

$$\begin{aligned}\mathcal{L} &= \bar{\psi}(i\not{D} - m)\psi - \frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} \\ &= \bar{\psi}(i\not{\partial} - m)\psi - \frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} + q\bar{\psi}\gamma^\mu\psi A_\mu\end{aligned}$$

$$F_{\mu\nu} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu$$

- ψ : parçacık yok etme, anti-parçacık yaratma
- $\bar{\psi}$: parçacık yaratma, anti-parçacık yok etme
- A_μ : foton yaratma ya da yok etme

$$\mathcal{L} = \bar{\psi}(i\not{\partial} - m)\psi \longrightarrow \bar{\psi}(\not{p} - m)\psi$$

$i(\not{p} - m)^{-1}$: elektron propagatörü

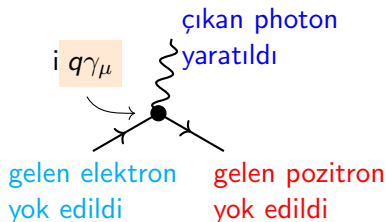
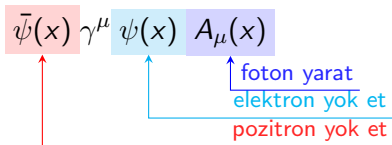
$$i(\not{p} - m)^{-1} = i \frac{\not{p} + m}{p^2 - m^2}$$

$$\begin{aligned}\mathcal{L}_F &= -\frac{1}{4}(\partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu)^2 = \frac{1}{4}(p_\mu A_\nu - p_\nu A_\mu)^2 - \frac{1}{2\xi}(p_\mu A^\mu)^2 \\ &= \frac{1}{2}A_\mu \left[p^2 g^{\mu\nu} - p^\mu p^\nu - \frac{1}{\xi} p^2 g^{\mu\nu} \right] A_\nu\end{aligned}$$

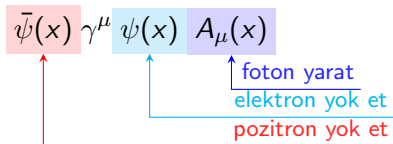
$$i \left[p^2 g^{\mu\nu} \left(1 - \frac{1}{\xi} \right) - p^\mu p^\nu \right]^{-1} = -i \frac{g^{\mu\nu}}{p^2} + \dots$$

foton propagatörü

$$\mathcal{L} = q \bar{\psi} \gamma^\mu \psi A_\mu$$

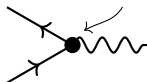


$$\mathcal{L} = q \bar{\psi} \gamma^\mu \psi A_\mu$$



gelen pozitron
yok edildi

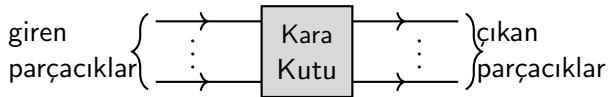
$$i q \gamma_\mu$$



gelen elektron
yok edildi

çıkan photon
yaratıldı

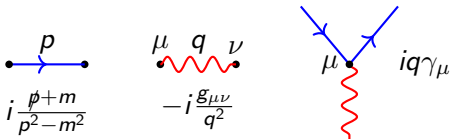
KEDİ – Feynman Diyagramları



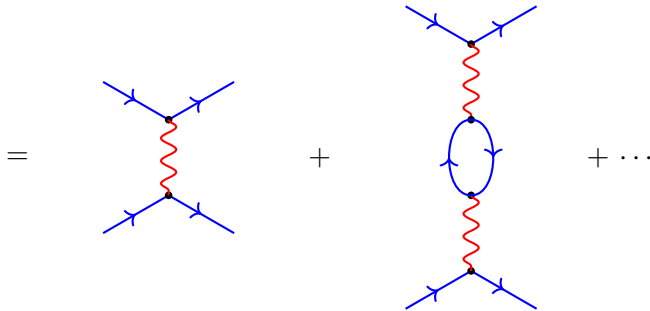
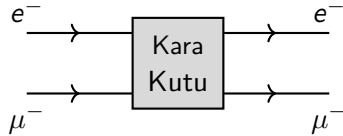
Kara Kutu

Kara kutuya giren parçacıkların çizgilerini, çıkan parçacıkların çizgileri ile birleştirecek şekilde “yap boz” parçaları ile doldur.

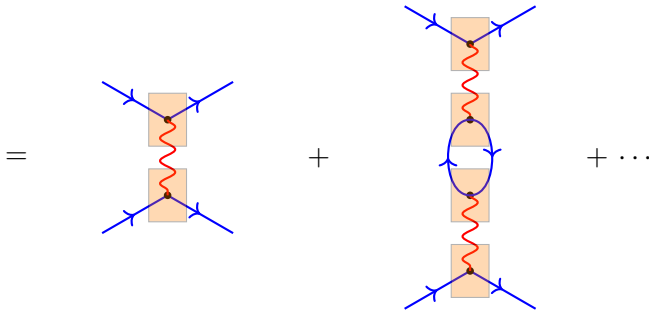
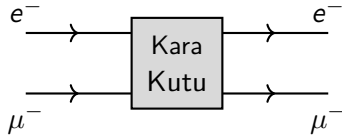
Yap-boz parçaları:



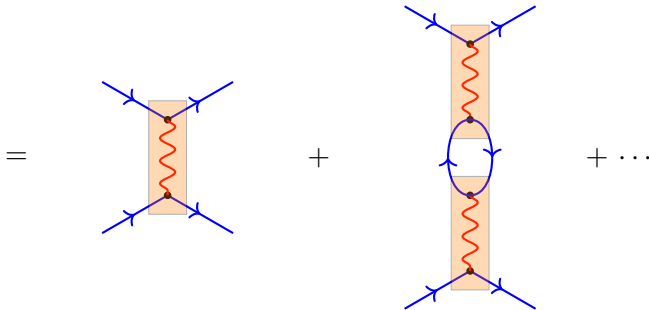
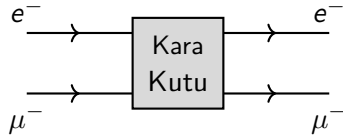
KEDİ – $e\mu$ Saçılması



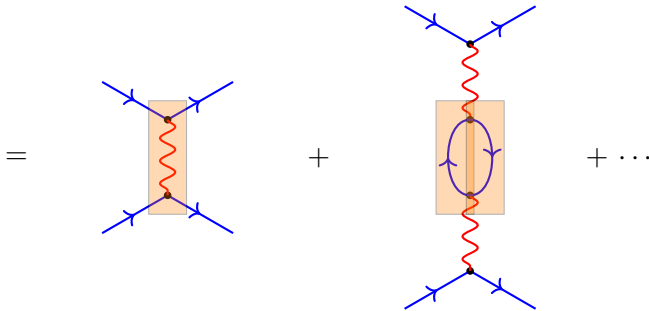
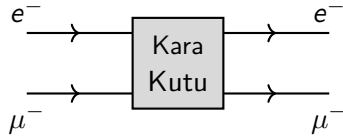
KEDİ – $e\mu$ Saçılması



KEDİ – $e\mu$ Saçılması



KEDİ – $e\mu$ Saçılması



- Helisite: bir parçacığın momentum yönündeki spin bileşeni

- Kütlesiz parçacıklar için (ışık hızında giden parçacıklar için)
Kiralite=helisite
- Helisite/Kiralite bütün gözlemciler için aynıdır
- Helisite/Kiralite kendiliğinden değişmez.

- Kütleli parçacıklar (ışık hızından yavaş hareket eden parçacıklar) için helisite gözlemciye göre değişir, ama kendiliğinden değişmez.
- Kiralite, gözlemciden bağımsız bir özelliktir, ama kendiliğinden değişir:

$$\psi = \psi_L + \psi_R$$
$$\mathcal{L}_m = -m\bar{\psi}\psi = -m(\bar{\psi}_L\psi_R + \bar{\psi}_R\psi_L)$$

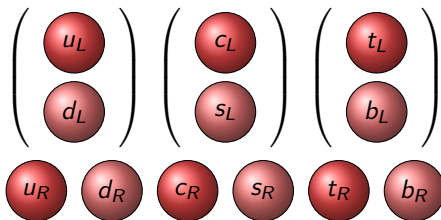
Standart Model

- 1 Standart Model, üç kuvveti (elektromanyetik, zayıf ve güçlü) kuvveti tasvir etmek için kullandığımız, bütün hızlandırıcı deneyleri ile uyumlu bir modeldir
- 2 $SU(3)_c \otimes SU(2)_L \otimes U(1)_Y$ ayar simetrisine sahip bir kuantum alan kuramıdır.
- 3 6 kuark, 6 lepton, 12 ayar bozonu ve bir skaler (Higgs parçacığı) parçacık içerir.

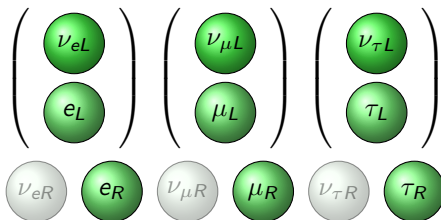
Standart Model'deki Parçacıklar

Fermiyonlar

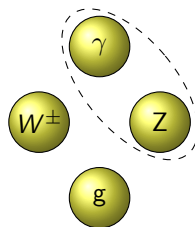
Kuarklar



Leptonlar



Ayar Bozonları



Higgs Bozonu



Standart Model Lagranjyanı

$$\begin{aligned}\mathcal{L}_{\text{SM}} = & -\frac{1}{4}W_{\mu\nu}^a W^{a\mu\nu} - \frac{1}{4}B_{\mu\nu}B^{\mu\nu} - \frac{1}{4}G_{\mu\nu}^A G^{A\mu\nu} & (\text{ayar}) \\ & + \sum_{i=1}^3 (\bar{Q}_{L,i} i\gamma^\mu \mathcal{D}_\mu Q_{L,i} + \bar{u}_{R,i} i\gamma^\mu \mathcal{D}_\mu u_{R,i} + \bar{d}_{R,i} i\gamma^\mu \mathcal{D}_\mu d_{R,i}) & (\text{kuark}) \\ & + \sum_{i=1}^3 (\bar{L}_{L,i} i\gamma^\mu \mathcal{D}_\mu L_{L,i} + \bar{e}_{R,i} i\gamma^\mu \mathcal{D}_\mu e_{R,i} + \bar{\nu}_{R,i} i\gamma^\mu \mathcal{D}_\mu \nu_{R,i}) & (\text{lepton}) \\ & + (\mathcal{D}_\mu H)^\dagger (\mathcal{D}^\mu H) - V(H) & (\text{Higgs}) \\ & - \left(\lambda_{ij}^u \bar{Q}_{L,i} H^c u_{R,j} + \lambda_{ij}^d \bar{Q}_{L,i} H d_{R,j} \right. \\ & \quad \left. + \lambda_{ij}^e \bar{L}_{L,i} H e_{R,j} + \lambda_{ij}^\nu \bar{L}_{L,i} H^c \nu_{R,j} + \text{h.e.} \right) & (\text{Yukawa})\end{aligned}$$

Standart Model Lagranjyanı

$$\begin{aligned}\mathcal{L}_{\text{SM}} = & -\frac{1}{4}W_{\mu\nu}^a W^{a\mu\nu} - \frac{1}{4}B_{\mu\nu}B^{\mu\nu} - \frac{1}{4}G_{\mu\nu}^A G^{A\mu\nu} & (\text{ayar}) \\ & + \sum_{i=1}^3 (\bar{Q}_{L,i} i\gamma^\mu \mathcal{D}_\mu Q_{L,i} + \bar{u}_{R,i} i\gamma^\mu \mathcal{D}_\mu u_{R,i} + \bar{d}_{R,i} i\gamma^\mu \mathcal{D}_\mu d_{R,i}) & (\text{kuark}) \\ & + \sum_{i=1}^3 (\bar{L}_{L,i} i\gamma^\mu \mathcal{D}_\mu L_{L,i} + \bar{e}_{R,i} i\gamma^\mu \mathcal{D}_\mu e_{R,i} + \bar{\nu}_{R,i} i\gamma^\mu \mathcal{D}_\mu \nu_{R,i}) & (\text{lepton}) \\ & + (\mathcal{D}_\mu H)^\dagger (\mathcal{D}^\mu H) - V(H) & (\text{Higgs}) \\ & - \left(\lambda_{ij}^u \bar{Q}_{L,i} H^c u_{R,j} + \lambda_{ij}^d \bar{Q}_{L,i} H d_{R,j} \right. \\ & \quad \left. + \lambda_{ij}^e \bar{L}_{L,i} H e_{R,j} + \lambda_{ij}^\nu \bar{L}_{L,i} H^c \nu_{R,j} + \text{h.e.} \right) & (\text{Yukawa})\end{aligned}$$

$$\mathcal{L}_{\text{ayar}} = -\frac{1}{4}W_{\mu\nu}^a W^{a\mu\nu} - \frac{1}{4}B_{\mu\nu} B^{\mu\nu} - \frac{1}{4}G_{\mu\nu}^A G^{A\mu\nu}$$

Burada

$$B_{\mu\nu} = \partial_\mu B_\nu - \partial_\nu B_\mu$$

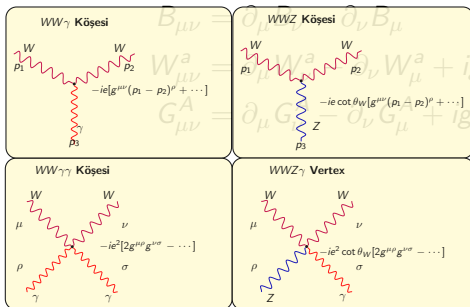
$$W_{\mu\nu}^a = \partial_\mu W_\nu^a - \partial_\nu W_\mu^a + ig_2 \epsilon^{abc} W_\mu^b W_\nu^c$$

$$G_{\mu\nu}^A = \partial_\mu G_\nu^A - \partial_\nu G_\mu^A + ig_3 f^{ABC} G_\mu^B G_\nu^C$$

Ayar Terimleri

$$\mathcal{L}_{\text{ayar}} = -\frac{1}{4}W_{\mu\nu}^a W^{a\mu\nu} - \frac{1}{4}B_{\mu\nu} B^{\mu\nu} - \frac{1}{4}G_{\mu\nu}^A G^{A\mu\nu}$$

Burada



$$g_2 \epsilon^{abc} W_\mu^b W_\nu^c$$

$$g_3 f^{ABC} G_\mu^B G_\nu^C$$

$$e = \sqrt{g_1^2 + g_2^2}$$

$$\tan \theta_W = \frac{g_1}{g_2}$$

Standart Model Lagranjyanı

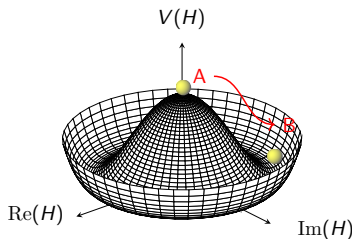
$$\begin{aligned}\mathcal{L}_{\text{SM}} = & -\frac{1}{4}W_{\mu\nu}^a W^{a\mu\nu} - \frac{1}{4}B_{\mu\nu}B^{\mu\nu} - \frac{1}{4}G_{\mu\nu}^A G^{A\mu\nu} & (\text{ayar}) \\ & + \sum_{i=1}^3 (\bar{Q}_{L,i} i\gamma^\mu \mathcal{D}_\mu Q_{L,i} + \bar{u}_{R,i} i\gamma^\mu \mathcal{D}_\mu u_{R,i} + \bar{d}_{R,i} i\gamma^\mu \mathcal{D}_\mu d_{R,i}) & (\text{kuark}) \\ & + \sum_{i=1}^3 (\bar{L}_{L,i} i\gamma^\mu \mathcal{D}_\mu L_{L,i} + \bar{e}_{R,i} i\gamma^\mu \mathcal{D}_\mu e_{R,i} + \bar{\nu}_{R,i} i\gamma^\mu \mathcal{D}_\mu \nu_{R,i}) & (\text{lepton}) \\ & + (\mathcal{D}_\mu H)^\dagger (\mathcal{D}^\mu H) - V(H) & (\text{Higgs}) \\ & - \left(\lambda_{ij}^u \bar{Q}_{L,i} H^c u_{R,j} + \lambda_{ij}^d \bar{Q}_{L,i} H d_{R,j} \right. \\ & \quad \left. + \lambda_{ij}^e \bar{L}_{L,i} H e_{R,j} + \lambda_{ij}^\nu \bar{L}_{L,i} H^c \nu_{R,j} + \text{h.e.} \right) & (\text{Yukawa})\end{aligned}$$

Higgs Terimleri

- 1 Ayar simetrisi, sol eli fermiyonlar ile sağ eli fermiyonları farklı dönüştürdüğü için, kütle terimi ekleyemeyiz.
- 2 Ayar simetrisi, ayar bozonlarının kütle terimlerinin yazılmasına izin vermez

$$\mathcal{L}_{\text{Higgs}} = (\mathcal{D}_\mu H)^\dagger (\mathcal{D}^\mu H) - V(H)$$

$$V(H) = -\mu^2 H^\dagger H + \lambda (H^\dagger H)^2$$



$$\mathcal{L}_{\text{Higgs}} = (\mathcal{D}_\mu H)^\dagger (\mathcal{D}^\mu H) - V(H)$$

$$D_\mu H = \left(\partial_\mu - ig_2 W_\mu^a \tau^a - ig_1 \frac{Y_H}{2} B_\mu \right) H$$

$$H = \begin{pmatrix} H^+ \\ H^0 \end{pmatrix}; \quad \langle H \rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ v \end{pmatrix}$$

$$H = e^{i\alpha_a \tau^a} \begin{pmatrix} 0 \\ v + \frac{h}{\sqrt{2}} \end{pmatrix}$$

$$\mathcal{L}_{\text{Higgs}} = (\mathcal{D}_\mu H)^\dagger (\mathcal{D}^\mu H) - V(H)$$

$$\begin{aligned}\mathcal{L}_{\text{Higgs}} &\supset -\frac{1}{4}g_2^2 v^2 |W_{\mu 1} + iW_{\mu 2}|^2 + \frac{v^2}{4} (g_1 B_\mu - g_2 W_{\mu 3})^2 \\ &\equiv -\frac{1}{4}e^2 \cos^2 \theta_W v^2 |W_{\mu 1} + iW_{\mu 2}|^2 \\ &\quad + \frac{1}{4}e^2 v^2 (-\sin \theta_W B_\mu + \cos \theta_W W_{\mu 3})^2 \\ &\equiv -\frac{1}{2}e^2 \cos^2 \theta_W v^2 W_\mu^+ W^{-\mu} + \frac{1}{4}e^2 v^2 Z_\mu Z^\mu\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\frac{m_W}{m_Z} = \cos \theta_W &\implies 0.88136 \pm 0.0015 (\text{PDG}) \text{ vs } 0.874 \\ (\sin^2 \theta_W = 0.236 \pm 0.003 \text{ arXiv:2405.09416})\end{aligned}$$

$$\tan \theta_W = \frac{g_1}{g_2}$$

Standart Model Lagranjyanı

$$\begin{aligned}\mathcal{L}_{\text{SM}} = & -\frac{1}{4}W_{\mu\nu}^a W^{a\mu\nu} - \frac{1}{4}B_{\mu\nu}B^{\mu\nu} - \frac{1}{4}G_{\mu\nu}^A G^{A\mu\nu} & (\text{ayar}) \\ & + \sum_{i=1}^3 (\bar{Q}_{L,i} i\gamma^\mu \mathcal{D}_\mu Q_{L,i} + \bar{u}_{R,i} i\gamma^\mu \mathcal{D}_\mu u_{R,i} + \bar{d}_{R,i} i\gamma^\mu \mathcal{D}_\mu d_{R,i}) & (\text{kuark}) \\ & + \sum_{i=1}^3 (\bar{L}_{L,i} i\gamma^\mu \mathcal{D}_\mu L_{L,i} + \bar{e}_{R,i} i\gamma^\mu \mathcal{D}_\mu e_{R,i} + \bar{\nu}_{R,i} i\gamma^\mu \mathcal{D}_\mu \nu_{R,i}) & (\text{lepton}) \\ & + (\mathcal{D}_\mu H)^\dagger (\mathcal{D}^\mu H) - V(H) & (\text{Higgs}) \\ & - \left(\lambda_{ij}^u \bar{Q}_{L,i} H^c u_{R,j} + \lambda_{ij}^d \bar{Q}_{L,i} H d_{R,j} \right. \\ & \quad \left. + \lambda_{ij}^e \bar{L}_{L,i} H e_{R,j} + \lambda_{ij}^\nu \bar{L}_{L,i} H^c \nu_{R,j} + \text{h.e.} \right) & (\text{Yukawa})\end{aligned}$$

Yukawa Terimleri ve Kuark Kütleleri

$$\mathcal{L}_Y = - \sum_{i,j=1}^3 \left(\lambda_{ij}^u \bar{Q}_{L,i} H^c u_{R,j} + \lambda_{ij}^d \bar{Q}_{L,i} H d_{R,j} + \text{h.e.} \right)$$

$$\langle H \rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ v \end{pmatrix} \quad \langle H^c \rangle = \begin{pmatrix} v \\ 0 \end{pmatrix}$$

Yukawa Terimleri ve Kuark Kütleleri

$$\begin{aligned}\mathcal{L}_Y &= - \sum_{i,j=1}^3 \left(\lambda_{ij}^u \bar{Q}_{L,i} H^c u_{R,j} + \lambda_{ij}^d \bar{Q}_{L,i} H d_{R,j} + \text{h.e.} \right) \\ &\longrightarrow - \sum_{i,j=1}^3 \left(\left(v + \frac{h}{\sqrt{2}} \right) \lambda_{ij}^u \bar{u}_{L,i} u_{R,j} + \lambda_{ij}^d \left(v + \frac{h}{\sqrt{2}} \right) \bar{d}_{L,i} H d_{R,j} + \text{h.e.} \right)\end{aligned}$$

- 1 Kütle terimleri köşegenel değil. $v\lambda$ matrislerinin köşegenleştirilmesi sonucu kütle öz durumları elde edilir
- 2 Kütle öz durumlarının Higgs parçacığı ile etkileşme sabiti m/v ile verilir: kütlelerin ve Higgs'in beklenen değerinin ölçülmesi, Higgs'in parçacıklarla etkileşme sabitini belirler.

Standart Model Lagranjiani

$$\mathcal{L}_{\text{SM}} = -\frac{1}{4}W_{\mu\nu}^a W^{a\mu\nu} - \frac{1}{4}B_{\mu\nu}B^{\mu\nu} - \frac{1}{4}G_{\mu\nu}^A G^{A\mu\nu} \quad (\text{ayar})$$

$$+ \sum_{i=1}^3 (\bar{Q}_{L,i} i\gamma^\mu \mathcal{D}_\mu Q_{L,i} + \bar{u}_{R,i} i\gamma^\mu \mathcal{D}_\mu u_{R,i} + \bar{d}_{R,i} i\gamma^\mu \mathcal{D}_\mu d_{R,i}) \quad (\text{kuark})$$

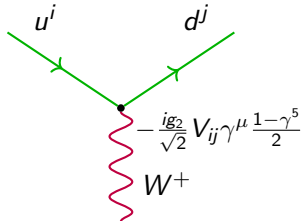
$$+ \sum_{i=1}^3 (\bar{L}_{L,i} i\gamma^\mu \mathcal{D}_\mu L_{L,i} + \bar{e}_{R,i} i\gamma^\mu \mathcal{D}_\mu e_{R,i} + \bar{\nu}_{R,i} i\gamma^\mu \mathcal{D}_\mu \nu_{R,i}) \quad (\text{lepton})$$

$$+ (\mathcal{D}_\mu H)^\dagger (\mathcal{D}^\mu H) - V(H) \quad (\text{Higgs})$$

$$- \left(\lambda_{ij}^u \bar{Q}_{L,i} H^c u_{R,j} + \lambda_{ij}^d \bar{Q}_{L,i} H d_{R,j} \right. \\ \left. + \lambda_{ij}^e \bar{L}_{L,i} H e_{R,j} + \lambda_{ij}^\nu \bar{L}_{L,i} H^c \nu_{R,j} + \text{h.e.} \right) \quad (\text{Yukawa})$$

$$\mathcal{L} \supset i \sum_{i,j=1}^3 \frac{g_2}{\sqrt{2}} (W_\mu^+ \bar{u}'_{iL} \gamma_\mu V_{CKM}^{ij} d'_{jL} + W_\mu^- \bar{d}'_{iL} \gamma_\mu V_{CKM}^{ji*} u'_{jL})$$

Wqq Köşesi



$$\mathcal{L} \supset i \sum_{i,j=1}^3 \frac{g_2}{\sqrt{2}} (W_\mu^+ \bar{u}'_{iL} \gamma_\mu V_{CKM}^{ij} d'_{jL} + W_\mu^- \bar{d}'_{iL} \gamma_\mu V_{CKM}^{ji*} u'_{jL})$$

- ❶ En genel N aileli durumda, V_{CKM} 'de

$$\frac{N(N-1)}{2}$$

tane dönme açısı

$$\frac{(N-1)(N-2)}{2}$$

tane fiziksel faz bulunur

- ❷ Standart Modelde $N = 3$ olduğundan, CKM matrisinde bir tane fiziksel faz bulunur ve SM'deki CP bozunmasının tek kaynağı bu fazdır.

CKM Matrisi ve Üniterlik Üçgeni

$$V_{CKM} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \sim \begin{pmatrix} 1 & \epsilon & \epsilon^3 \\ \epsilon & 1 & \epsilon^2 \\ \epsilon^3 & \epsilon^2 & 1 \end{pmatrix} \quad \epsilon \simeq 0.22$$

V_{CKM} 'nin üniterliğinden dolayı, mesela:

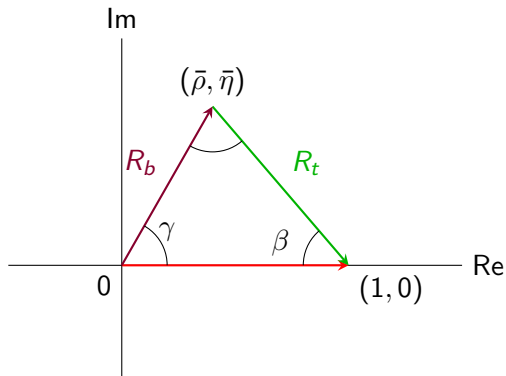
$$V_{ub}^* V_{ud} + V_{cb}^* V_{cd} + V_{tb}^* V_{td} = 0$$

veya

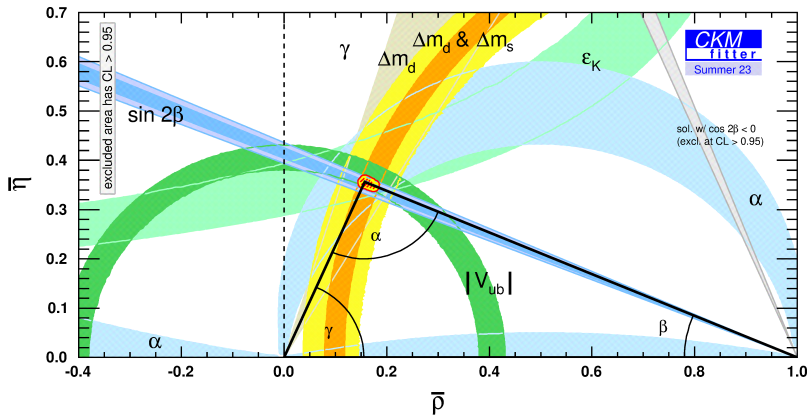
$$\frac{V_{ub}^* V_{ud}}{V_{cb}^* V_{cd}} + \frac{V_{tb}^* V_{td}}{V_{cb}^* V_{cd}} + 1 \equiv 1 - R_b e^{i\gamma} - R_t e^{-i\beta} = 0$$

CKM Matrisi ve Üniterlik Üçgeni

$$\frac{V_{ub}^* V_{ud}}{V_{cb}^* V_{cd}} + \frac{V_{tb}^* V_{td}}{V_{cb}^* V_{cd}} + 1 \equiv 1 - R_b e^{i\gamma} - R_t e^{-i\beta} = 0$$



CKM Matrisi ve Üniterlik Üçgeni



Standart Modelin Cevaplayamadıkları-I

- ❶ Niye kuark aile sayısı ile lepton aile sayısı aynı?
- ❷ Neden 3 tane aile var?
- ❸ Neden elektrik yükü kesikli: $Q = I_3 + \frac{Y}{2}$
- ❹ Standart Model'de niye bu kadar parametre var? (3 etkileşim sabiti(g_i), 1 Higgs kütlesi, 1 Higgs kendisi ile etkileşme sabiti, 6 kuark kütlesi, 4 CKM parametresi, 3 lepton kütlesi: toplam 18 parametre (nötrino parametreleri hariç))
- ❺ Neden parçacıkların bu kadar farklı kütleleri var? $\frac{m_t}{m_e} = \mathcal{O}(10^5)$
- ❻ Higgs'in kütlesi neden bu kadar küçük?
- ❼ nötrinoların Majorana kütleleri var mı?
- ❽ ...

Standart Modelin Cevaplayamadıkları-II

- 1 Evren niye 3 boyutlu?
- 2 Kütle çekimi nerede?
- 3 Kütle çekimi neden bu kadar zayıf?
- 4 Karanlık madde ne?
- 5 Karanlık enerji ne?
- 6 Evrendeki madde anti madde asimetrisinin sebebi ne?

I. Dersin Sonu

II. Derste görüşmek üzere

Galaksi Dönme Eğrileri ve Karanlık Madde

- Glaksisinin merkezi etrafında dönen bir yıldız için, v merkez etrafında dönme hızı, ve $M(r)$ merkez ile yıldız arasındaki kütle ise

$$m \frac{v^2}{r} = G_N \frac{mM(r)}{r^2}$$

olmalıdır.

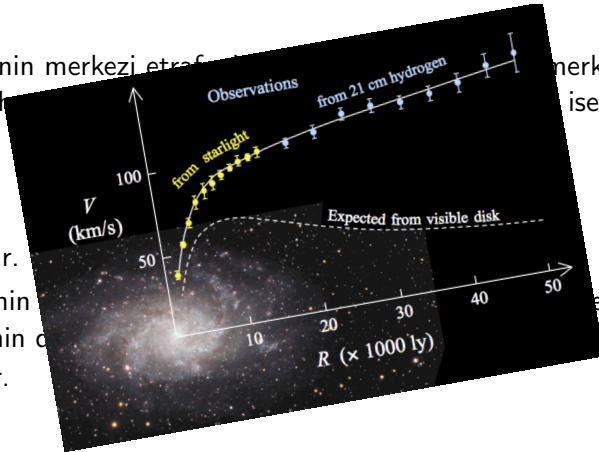
- Galaksinin içinde $M(r) \propto r^3$ olacağından $v \propto r$ olması beklenirken, galaksinin dışında $M(r) = \text{sabit}$ olacağından $v(r) \propto \frac{1}{\sqrt{r}}$ olması beklenir.

Galaksi Dönme Eğrileri ve Karanlık Madde

- Galaksinin merkezi etrafında dönme hızı, merkez etrafında beklenenden daha yüksektir.

olmalıdır.

- Galaksinin dış bölgelerinde, gözlemlenen dönme hızı, beklenen hızdan daha yüksektir. Bu, galaksinin dış bölgelerinde karanlık madde bulunması gerektiğini gösterir.

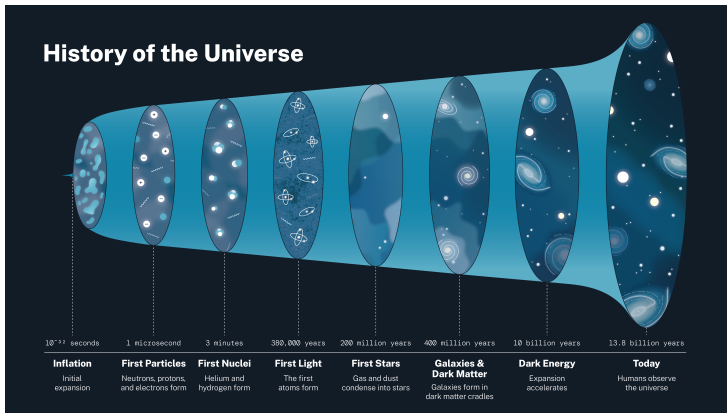


Galaksi Dönme Eğrileri ve Karanlık Madde

- Yıldızlar beklediğimizden daha hızlı dönüyor.
- Bu hızda yıldızları galaksiye bağlı tutmak için görünen yıldızların kütle çekimi yeterli değil.
- Olası bir açıklama galakside görmediğimiz ve kütle çekimi yaratan bir şey daha var: karanlık madde

Evrenin Genişlemesi ve Karanlık Enerji

- Evrendeki galaksiler birbirlerinden uzaklaşıyorlar: evren genişliyor
- Kütle çekiminin bu genişlemeyi yavaşlatması beklenirken, evrenin genişlemesi hızlanıyor.
- Evreni dışarı iten “şey” karanlık enerji



Madde Anti Madde Asimetrisi

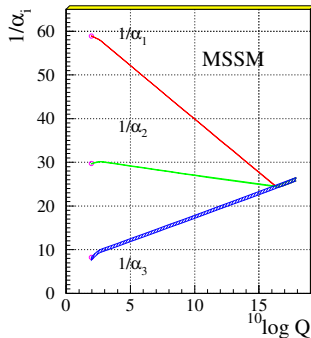
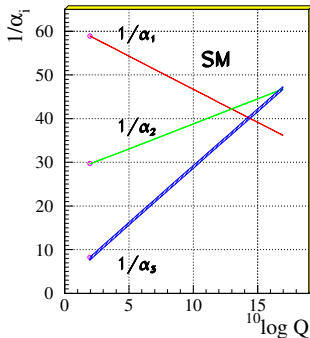
- 1 Gördüğümüz evren neredeyse tamamen maddeden oluşuyor.
- 2 Madde ve anti madde neredeyse hep aynı miktarlarda oluşur.
- 3 Sakharov (1967) Kriterleri: B , CP bozunması ve denge dışı süreçler
- 4 V_{CKM} 'deki fiziksel fazdan dolayı, SM'de CP bozunması var, ancak gözlemlenen kadar büyük bir fark yaratacak kadar değil.

Genellikle

- 1 Fermiyon Sektörü
- 2 Ayar Sektörü
- 3 Higgs Sektörü

bir veya birden fazlasını genelleştirerek elde edilirler.

GUT Kuramları



- Ayar kuvvetlerinin etkileşim sabitleri yüksek enerjilerde birbirlerine yaklaşıyor.
- Ya daha da yüksek enerjilerde tek bir kuvvete dönüşürlerse?

GUT Kuramları

- Düşük enerjilerde Standard Modele dönüşebilmesi için, ayar simetrisinin Standart Modelin ayar simetrisini içermesi gerekir.
- En yaygın incelenen simetriler $SU(5)$ ve $SO(10)$ simetrileridir.
- İkili gösterimleri yoktur, daha yüksek boyutlu gösterimleri vardır.
- Her bir ailedeki parçacık sayısı:

$$3(u_L) + 3(d_L) + 3(u_R) + 3(d_R) + 1(e_R) + 1(e_L) + 1(\nu_{eL}) + 1(\nu_{\tau R}) = 15 + 1$$

- $SO(10)$ 'un 16 boyutlu bir gösterimi var. Dolayısıyla $SO(10)$ 'a dayalı GUT, ν_R olmasını gerektirir.
- $SU(5)$ 'in 5 boyutlu ve 10 boyutlu gösterimleri var.
- GUT'larda SM'den fazla Higgs parçacığı vardır, daha fazla CP simetri bozan parametresi vardır.
- Yeni parçacıklar kararlı olabilir, karanlık maddeyi oluşturuyor olabilirler
- Elektrik yükünün kesikli olmasını öngörür.

- Leptonlar ve kuarklar aynı gösterimde oldukları için, ayar etkileşimleri ile birbirlerine dönüşebilirler: proton kararlı değildir.
- Protonun ömrü 10^{34} yıldan daha fazla.

- Olası en geniş uzay-zaman simetrisidir.
- Fermiyonlar ile bozonlar arası bir simetri ön görür.
- Kozmolojik sabitin niye bu kadar küçük olduğunu açıklayabilir.
- Higgs kütlesine gelen düzeltmelerin niye bu kadar küçük bir kütle verdiğini açıklayabilir.
- Etkileşim sabitlerinin yüksek enerjilerde tamamen üst üste gelmesini sağlayabilir.
- R paritesi de varsa, en hafif süpersimetrik parçacık tamamen kararlı olacaktır, karanlık madde olabilir

- Fermiyonlarla bozonlar arasında gördüğümüz bir simetri yok. SUSY'nin kırılmış olması lazım.
- Parçacık sayısını iki katından fazla artırır. Bu parçacıklar gözlenmedi
- Parametre sayısı 100ün üzerine çıkar.

- SM'deki temel parçacıkların bir kısmı (ya da hepsi) daha temel parçacıklardan oluşur
- Daha az sayıda temel parçacık içerirler
- SM'deki parçacıkların uyarılmış durumlarının olduğunu öngörürler

- Temel parçacıklar nokta değil, küçük sicimlerdir.
- Uzay-zamanın 10 boyutlu olduğunu ön görür.
- Ekstra 6 boyut, çok küçük olabilir, veya biz 4 boyutlu bir zar üzerinde bulunuyor olabiliriz.
- Kütle çekimi doğal olarak kuramın içinde bulunur.
- Tek serbest parametresi vardır(?)

- Öngörülerinin test edilebilmesi için Planck enerji skalasına çıkmak gerekir.
- 10^{500} 'den fazla olası düşün enerji durumu vardır.
- AdS/CFT gibi, güçlü etkileşen kuramların daha iyi anlaşılmasını sağlayan yöntemlerin gelişmesini sağlamıştır.

- 1 4. Aile
- 2 2Higgs Çiftlisi Modeli (GUT ve SUSY birden çok Higg parçacığı öngörmektedir.)
- 3 Ekstra $U(1)$ Simetrileri (büyük simetriler, SM simetrisine kırılırken çoğunlukla, fazladan $U(1)$ simetrileri de ortaya çıkmaktadır.)
- 4 Ekstra boyutlar

Ekstra boyutlar

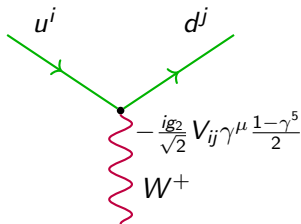
- Sicim kuramı, fazladan 6 boyut öngörmektedirler. Bu ek boyutlar, doğal olarak Planck uzunluğundadırlar. Eğer bir şekilde bu boyutlar daha büyük olabilir mi?
- Kütle çekimi, ek boyutun büyüklüğünden daha kısa mesafelerde $1/r^{2+\delta}$ gibi davranacaktır. (δ ek boyut sayısı)
- Çok kısa mesafelerde, kütle çekimi çok çabuk zayıflayacaktır.
- Kütle çekiminin zayıflığını doğal bir yöntemle açıklayabilir.
- Ek boyutlar için mevcut sınır: 10^{-3} cm

Sonuç

Dinlediğiniz için teşekkür ederim ...

Wqq Köşesi

Wqq Köşesi

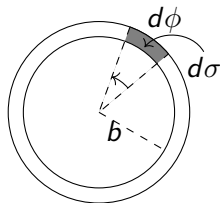
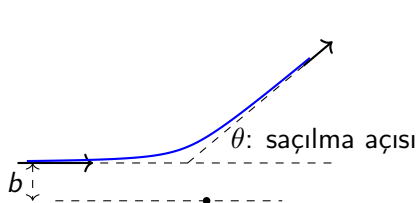


Ders II: Kuramdan Gözleme

Prof. Dr. Altuğ Özpineci

ODTÜ Fizik Bölümü

Tesir Kesiti – Klasik Fizik Tanımı



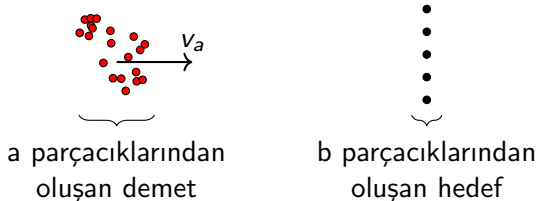
$$\theta = \theta(b, p) \Rightarrow b = b(\theta)$$

$d\sigma$: $d\Omega = \sin \theta d\theta d\phi$ katı açısına saçılması için hedef alınması gereken alan; diferansiyel tesir kesiti

$$d\sigma(\theta, \phi) = b(\theta) db d\phi$$

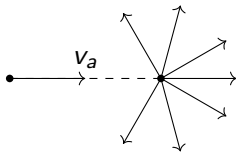
$$\boxed{\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{b(\theta)}{\sin \theta} \frac{db}{d\theta}} = b(\theta) \frac{db}{d \cos \theta}$$

Tesir Kesiti – Klasik Alternatif Tanım



- n_a : a parçacıklarının yoğunluğu
- n_b : hedef b parçacıklarının yoğunluğu
- A : a parçacıklarının demetinin kesit alanı

Tesir Kesiti – Klasik Alternatif Tanım



saçılmış a parçacıkları

- dN_a : $d\Omega$ katı açısına saçılmış parçacık sayısı ($d\Omega = \frac{d(\text{detektörün alanı})}{R^2}$)
- N_b : hedefteki b parçacıklarının sayısı
- N_a : demetteki a parçacıklarının sayısı
- $\frac{dN_a}{N_a}$: saçılan parçacıkların oranı
- $d\sigma$: her bir b parçacığından $d\Omega$ katı açısına saçılma tesir kesiti

$$\frac{dN_a}{N_a} = \frac{N_b d\sigma}{A}$$

Tesir Kesiti – Klasik Alternatif Tanım

$$d\sigma = \frac{A dN_a}{N_a N_b}$$

Belli bir t süresince

$$N_a = n_a (A v_a dt) \quad \Rightarrow$$

$$d\sigma = \frac{A dN_a}{n_a A v_a dt N_b} = \frac{dN_a/dt}{(n_a v_a) N_b}$$

$N_b = 1$ için

$$d\sigma = \frac{dN_a/dt}{(n_a v_a)}$$

- $\frac{dN_a}{dt}$: saçılan parçacık “akısı”
- $n_a v_a$: gelen parçacık akısı

$$d\sigma = \frac{dN_a/dt}{(n_a v_a)} \quad (\text{hedefte tek parçacık için})$$

Doğrudan ölçülebilir nicelikler cinsinden bir ifade.

$$d\sigma = \frac{dN_a/dt}{(n_a v_a)} \quad (\text{hedefte tek parçacık için})$$

Doğrudan ölçülebilir nicelikler cinsinden bir ifade.

Kuantum Mekanikte Genelleştirilebilen Bir İfade

$$\frac{1}{N_a} \frac{dN_a}{dt} = \text{birim zamanda geçiş olasılığı}$$

$N_a = 1$ için: $\frac{dN_a}{dt}$: birim zamanda geçiş olasılığı

$$d\sigma = \frac{dN_a/dt}{(n_a v_a)} \quad (\text{hedefte tek parçacık için})$$

Doğrudan ölçülebilir nicelikler cinsinden bir ifade.

Kuantum Mekaniğe Genelleştirilebilen Bir İfade

$$\frac{1}{N_a} \frac{dN_a}{dt} = \text{birim zamanda geçiş olasılığı}$$

$N_a = 1$ için: $\frac{dN_a}{dt}$: birim zamanda geçiş olasılığı

$$d\sigma = |\mathcal{M}|^2$$

$$d\sigma = \frac{dN_a/dt}{(n_a v_a)} \quad (\text{hedefte tek parçacık için})$$

Doğrudan ölçülebilir nicelikler cinsinden bir ifade.

Kuantum Mekanığe Genelleştirilebilen Bir İfade

$$\frac{1}{N_a} \frac{dN_a}{dt} = \text{birim zamanda geçiş olasılığı}$$

$N_a = 1$ için: $\frac{dN_a}{dt}$: birim zamanda geçiş olasılığı

$$d\sigma = |\mathcal{M}|^2 (2\pi)^4 \delta^4(\sum p_i - \sum p_f)$$

$$d\sigma = \frac{dN_a/dt}{(n_a v_a)} \quad (\text{hedefte tek parçacık için})$$

Doğrudan ölçülebilir nicelikler cinsinden bir ifade.

Kuantum Mekanığe Genelleştirilebilen Bir İfade

$$\frac{1}{N_a} \frac{dN_a}{dt} = \text{birim zamanda geçiş olasılığı}$$

$N_a = 1$ için: $\frac{dN_a}{dt}$: birim zamanda geçiş olasılığı

$$d\sigma = |\mathcal{M}|^2 (2\pi)^4 \delta^4(\sum p_i - \sum p_f) \prod_f \frac{d^3 p_f}{(2\pi)^3 2E_f}$$

$$d\sigma = \frac{dN_a/dt}{(n_a v_a)} \quad (\text{hedefte tek parçacık için})$$

Doğrudan ölçülebilir nicelikler cinsinden bir ifade.

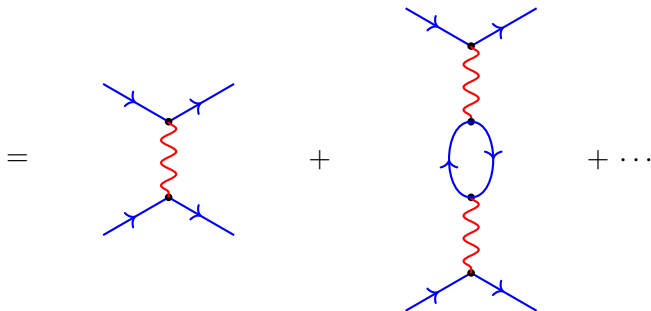
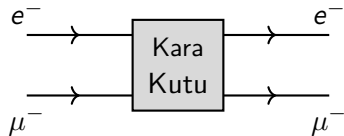
Kuantum Mekanikçe Genelleştirilebilen Bir İfade

$$\frac{1}{N_a} \frac{dN_a}{dt} = \text{birim zamanda geçiş olasılığı}$$

$N_a = 1$ için: $\frac{dN_a}{dt}$: birim zamanda geçiş olasılığı

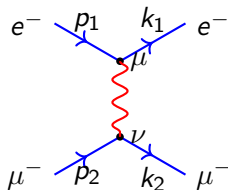
$$d\sigma = \frac{1}{\sqrt{p_1^2 p_2^2 - (p_1 p_2)^2}} |\mathcal{M}|^2 (2\pi)^4 \delta^4(\sum p_i - \sum p_f) \prod_f \frac{d^3 p_f}{(2\pi)^3 2E_f}$$

KEDİ – $e\mu$ Saçılması

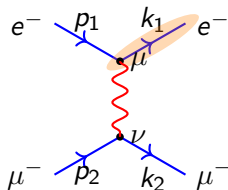


$$\langle \text{son} | e^{-iHt} | \text{ilk} \rangle = \int d^3x \, \psi_{\text{son}}^*(\vec{x}) \psi_{\text{ilk}}(\vec{x}) \dots$$

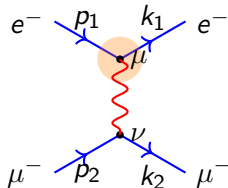
matris elementleri, dalga fonksiyonları, ile orantılıdır.



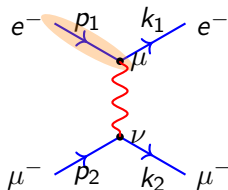
$i\mathcal{M}$



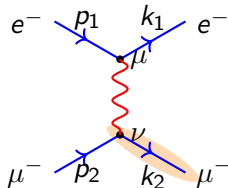
$$i\mathcal{M} = \bar{e}(k_1)$$



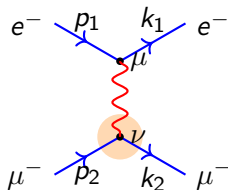
$$i\mathcal{M} = \bar{e}(k_1)(iq\gamma_\mu)$$



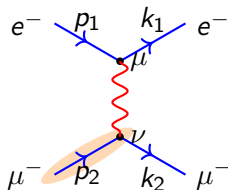
$$i\mathcal{M} = \bar{e}(k_1)(iq\gamma_\mu)e(p_1)$$



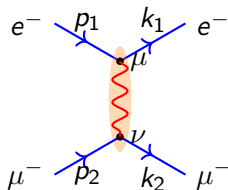
$$i\mathcal{M} = \bar{e}(k_1)(iq\gamma_\mu)e(p_1) \bar{\mu}(k_2)$$



$$i\mathcal{M} = \bar{e}(k_1)(iq\gamma_\mu)e(p_1) \bar{\mu}(k_2)(iq\gamma_\nu)$$



$$i\mathcal{M} = \bar{e}(k_1)(iq\gamma_\mu)e(p_1) \bar{\mu}(k_2)(iq\gamma_\nu)\mu(p_2)$$



$$i\mathcal{M} = \bar{e}(k_1)(iq\gamma_\mu)e(p_1) \bar{\mu}(k_2)(iq\gamma_\nu)\mu(p_2) \frac{-ig^{\mu\nu}}{q^2}$$

$$q^2 = (k_1 - p_1)^2 = (k_2 - p_2)^2$$

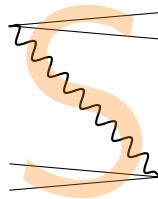
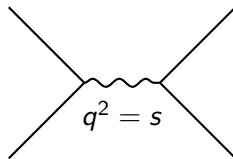
KEDİ – Mandelstam Değişkenleri

$$s = (p_1 + p_2)^2 = (k_1 + k_2)^2$$

$$t = (p_1 - k_1)^2 = (p_2 - k_2)^2$$

$$u = (p_1 - k_2)^2 = (p_2 - k_1)^2$$

s-kanalı

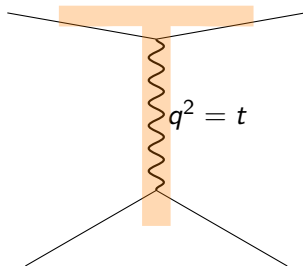


t-kanalı

$$s = (p_1 + p_2)^2 = (k_1 + k_2)^2$$

$$t = (p_1 - k_1)^2 = (p_2 - k_2)^2$$

$$u = (p_1 - k_2)^2 = (p_2 - k_1)^2$$

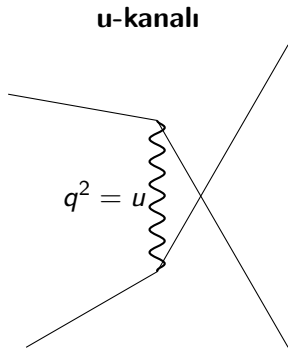


KEDİ – Mandelstam Değişkenleri

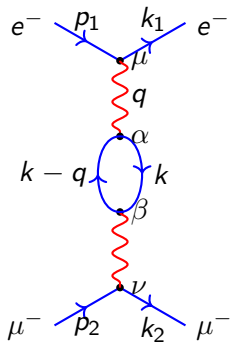
$$s = (p_1 + p_2)^2 = (k_1 + k_2)^2$$

$$t = (p_1 - k_1)^2 = (p_2 - k_2)^2$$

$$u = (p_1 - k_2)^2 = (p_2 - k_1)^2$$

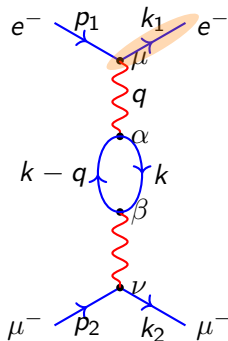


KEDİ – Matris Elemanları



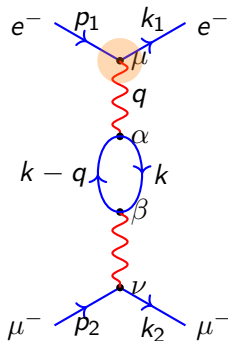
$i\mathcal{M}$

KEDİ – Matris Elemanları



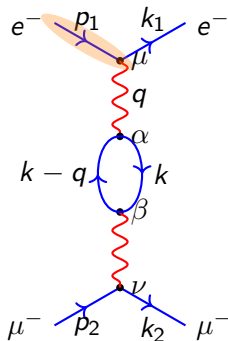
$$i\mathcal{M} = \bar{e}(k_1)$$

KEDİ – Matris Elemanları



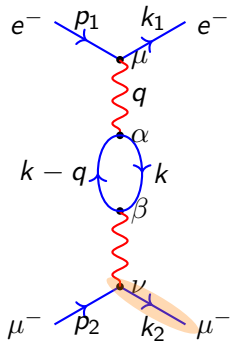
$$i\mathcal{M} = \bar{e}(k_1)(iq\gamma_\mu)$$

KEDİ – Matris Elemanları



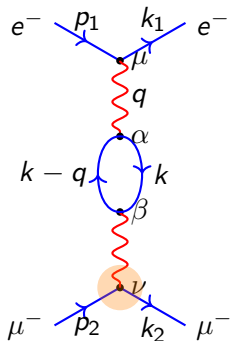
$$i\mathcal{M} = \bar{e}(k_1)(iq\gamma_\mu)e(p_1)$$

KEDİ – Matris Elemanları



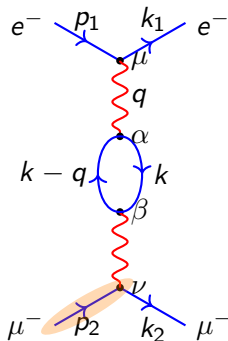
$$i\mathcal{M} = \bar{e}(k_1)(iq\gamma_\mu)e(p_1) \bar{\mu}(k_2)$$

KEDİ – Matris Elemanları



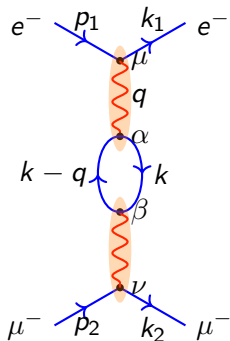
$$i\mathcal{M} = \bar{e}(k_1)(iq\gamma_\mu)e(p_1) \bar{\mu}(k_2)(iq\gamma_\nu)$$

KEDİ – Matris Elemanları



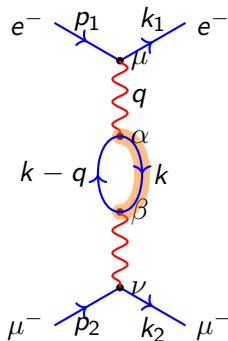
$$i\mathcal{M} = \bar{e}(k_1)(iq\gamma_\mu)e(p_1) \bar{\mu}(k_2)(iq\gamma_\nu)\mu(p_2)$$

KEDİ – Matris Elemanları



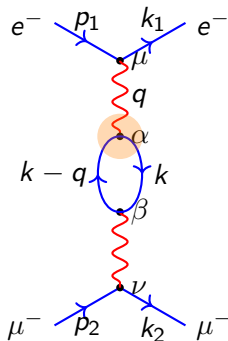
$$i\mathcal{M} = \bar{e}(k_1)(iq\gamma_\mu)e(p_1) \bar{\mu}(k_2)(iq\gamma_\nu)\mu(p_2) \frac{-ig^{\mu\alpha}}{q^2} \frac{-ig^{\beta\nu}}{q^2}$$

KEDİ – Matris Elemanları



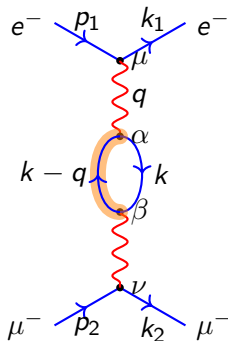
$$i\mathcal{M} = \bar{e}(k_1)(iq\gamma_\mu)e(p_1) \bar{\mu}(k_2)(iq\gamma_\nu)\mu(p_2) \frac{-ig^{\mu\alpha}}{q^2} \frac{-ig^{\beta\nu}}{q^2} \\ \times i \frac{\not{k} + m}{k^2 - m^2}$$

KEDİ – Matris Elemanları



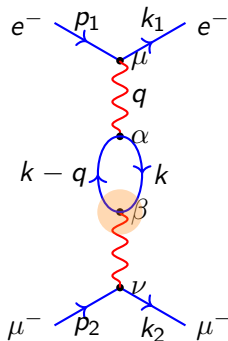
$$i\mathcal{M} = \bar{e}(k_1)(iq\gamma_\mu)e(p_1) \bar{\mu}(k_2)(iq\gamma_\nu)\mu(p_2) \frac{-ig^{\mu\alpha}}{q^2} \frac{-ig^{\beta\nu}}{q^2} \\ \times i \frac{\not{k} + m}{k^2 - m^2} iq\gamma_\alpha$$

KEDİ – Matris Elemanları



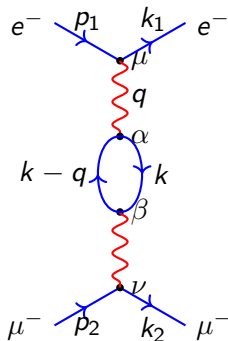
$$i\mathcal{M} = \bar{e}(k_1)(iq\gamma_\mu)e(p_1) \bar{\mu}(k_2)(iq\gamma_\nu)\mu(p_2) \frac{-ig^{\mu\alpha}}{q^2} \frac{-ig^{\beta\nu}}{q^2} \\ \times i \frac{\not{k} + m}{k^2 - m^2} iq\gamma_\alpha i \frac{\not{k} - \not{q} + m}{(k - q)^2 - m^2}$$

KEDİ – Matris Elemanları



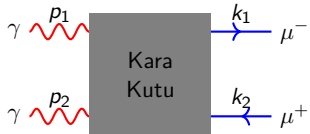
$$i\mathcal{M} = \bar{e}(k_1)(iq\gamma_\mu)e(p_1) \bar{\mu}(k_2)(iq\gamma_\nu)\mu(p_2) \frac{-ig^{\mu\alpha}}{q^2} \frac{-ig^{\beta\nu}}{q^2} \\ \times i \frac{\not{k} + m}{k^2 - m^2} iq\gamma_\alpha i \frac{\not{k} - \not{q} + m}{(k - q)^2 - m^2} iq\gamma_\beta$$

KEDİ – Matris Elemanları

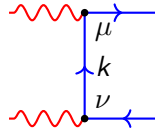


$$i\mathcal{M} = \bar{e}(k_1)(iq\gamma_\mu)e(p_1) \bar{\mu}(k_2)(iq\gamma_\nu)\mu(p_2) \frac{-ig^{\mu\alpha}}{q^2} \frac{-ig^{\beta\nu}}{q^2} \\ \times \int \frac{d^4k}{(2\pi)^4} (-1) i \text{Tr} \left(i \frac{\not{k} + m}{k^2 - m^2} iq\gamma_\alpha i \frac{\not{k} - \not{q} + m}{(k - q)^2 - m^2} iq\gamma_\beta \right)$$

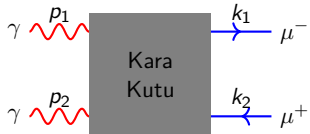
$\gamma\gamma \rightarrow \mu^+\mu^-$ Saçılması



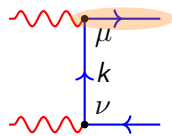
$i\mathcal{M}$



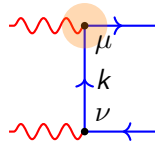
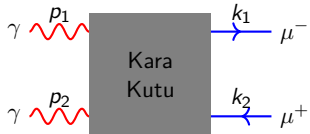
$\gamma\gamma \rightarrow \mu^+\mu^-$ Saçılması



$$i\mathcal{M} = \bar{\mu}(k_1)$$

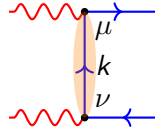
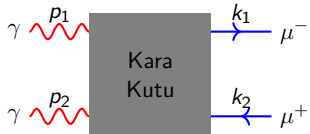


$\gamma\gamma \rightarrow \mu^+\mu^-$ Saçılması



$$i\mathcal{M} = \bar{\mu}(k_1) i q \gamma_\mu$$

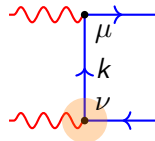
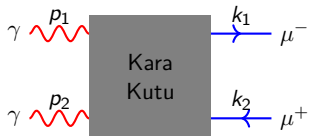
$\gamma\gamma \rightarrow \mu^+\mu^-$ Saçılması



$$i\mathcal{M} = \bar{\mu}(k_1) i q \gamma_\mu i \frac{\not{k} + m}{k^2 - m^2}$$

$$k = p_2 + k_2$$

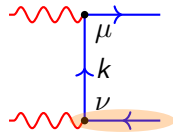
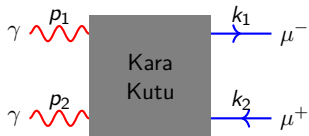
$\gamma\gamma \rightarrow \mu^+\mu^-$ Saçılması



$$i\mathcal{M} = \bar{\mu}(k_1) i q \gamma_\mu i \frac{\not{k} + m}{k^2 - m^2} i q \gamma_\nu$$

$$k = p_2 + k_2$$

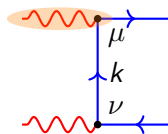
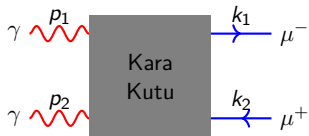
$\gamma\gamma \rightarrow \mu^+\mu^-$ Saçılması



$$i\mathcal{M} = \bar{\mu}(k_1) i q \gamma_\mu i \frac{\not{k} + m}{k^2 - m^2} i q \gamma_\nu \mu(k_2)$$

$$k = p_2 + k_2$$

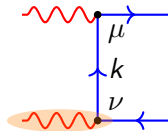
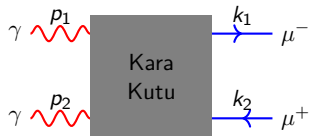
$\gamma\gamma \rightarrow \mu^+\mu^-$ Saçılması



$$i\mathcal{M} = \bar{\mu}(k_1) i q \gamma_\mu i \frac{\not{k} + m}{k^2 - m^2} i q \gamma_\nu \mu(k_2) \epsilon_\mu(p_1)$$

$$k = p_2 + k_2$$

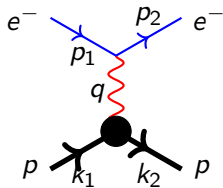
$\gamma\gamma \rightarrow \mu^+\mu^-$ Saçılması



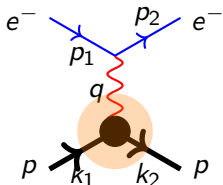
$$i\mathcal{M} = \bar{\mu}(k_1) i q \gamma_\mu i \frac{\not{k} + m}{k^2 - m^2} i q \gamma_\nu \mu(k_2) \epsilon_\mu(p_1) \epsilon_\nu(p_2)$$

$$k = p_2 + k_2$$

Esnek ep Saçılması



Esnek ep Saçılması



Lorentz dönüşmezliği, C ve P korunumu:

$$iq \left(\gamma_\mu F_1(q^2) + i \frac{\sigma_{\mu\nu} q^\nu}{2m_p} F_2(q^2) \right)$$

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega} \right)_{lab} = \frac{\alpha_e^2}{4E^2 \sin^4 \frac{\theta}{2}} \frac{E'}{E} \left\{ \left(F_1^2 - \frac{q^2}{4m_p^2} F_2^2 \right) \cos^2 \frac{\theta}{2} - \frac{q^2}{2m_p^2} (F_1 + F_2)^2 \sin^2 \frac{\theta}{2} \right\}$$

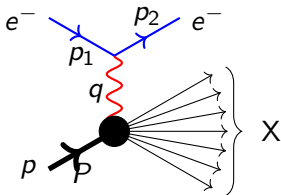
E : Yollanan elektronun enerjisi

E' : Saçılan elektronun enerjisi

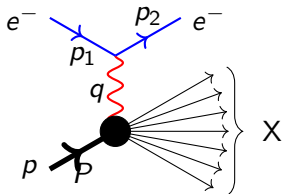
θ : Elektronun saçılma açısı

Esnek Olmayan ep saçılması (DIS)

$$\frac{d\sigma_T}{d\Omega} = \sum_X \frac{d\sigma}{d\Omega}(e^- p \rightarrow e^- X) = ?$$



Esnek Olmayan ep saçılması (DIS)



$$\frac{d\sigma_T}{d\Omega} = \sum_X \frac{d\sigma}{d\Omega}(e^- p \rightarrow e^- X) = ?$$

W_i hangi Lorentz değişmezlerle bağlı olabilir?

- $Q^2 \equiv q^2$
- $Pq \Rightarrow \nu = \frac{Pq}{m_p} \equiv (E - E')_{lab}$ ya da
- $x = \frac{Q^2}{2Pq} = \frac{Q^2}{2m_p\nu}$

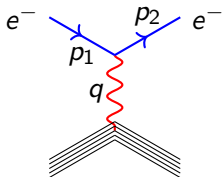
Esnek saçılmada

$$Pq = \frac{1}{2}[(P + q)^2 - p^2 - q^2] = \frac{Q^2}{2}$$

dolayısıyla $x = 1$.

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega dE'} \right)_{lab} = \frac{\alpha_e^2}{8\pi E^2 \sin^4 \frac{\theta}{2}} \left\{ \frac{m_p}{2} W_2 \cos^2 \frac{\theta}{2} + \frac{1}{m_p} W_1 \sin^2 \frac{\theta}{2} \right\}$$

Parton Modeli



- Her hangi bir parton için, $\frac{Q^2}{2p_i q} = 1$
- Partonun, protonun momentumunun ξ katını taşıdığını kabul edelim: $p_i = \xi P$.
Bu durumda

$$x = \frac{Q^2}{2Pq} = \xi \frac{Q^2}{2p_i q} = \xi$$

- Parton modelinde x , elektronun saçıldığı partonun momentumunun, protonun momentumunun kaçta kaç olduğunu belirler.
- $f_i(\xi)$: i partonunun, ξ momentum kesri taşıyor olma olasılığı olsun (PDF). Bu durumda

$$\sigma(e^- p \rightarrow e^- X) = \sum_i \int_0^1 d\xi f_i(\xi) \hat{\sigma}(e^- p_i \rightarrow e^- X)$$

Parton Modeli

Partonlar birbirini etkilemeyen, Q_i yüklü, spin-1/2 parçacıklar ise

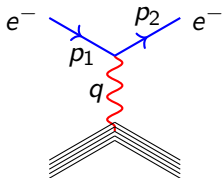
- $W_1(x, Q) = 2\pi \sum_i Q_i^2 f_i(x)$
- $W_2(x, Q) = 8\pi \frac{x^2}{Q^2} \sum_i Q_i^2 f_i(x)$

Öngörüler:

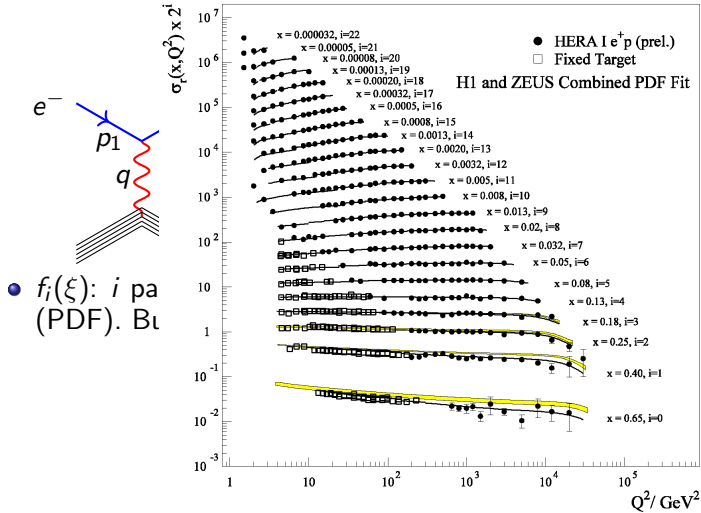
- W_1 ve $Q^2 W_2$ fonksiyonları Q 'dan bağımsızdır.
- $W_1(x, Q) = \frac{Q^2}{4x^2} W_2(x, Q)$ ($Q \gg m_p$) (Callan-Gross bağıntısı)

- $f_i(\xi)$: i partonunun, ξ momentum kesri taşıyor olma olasılığı olsun (PDF). Bu durumda

$$\sigma(e^- p \rightarrow e^- X) = \sum_i \int_0^1 d\xi f_i(\xi) \hat{\sigma}(e^- p_i \rightarrow e^- X)$$



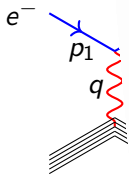
Parton Modeli



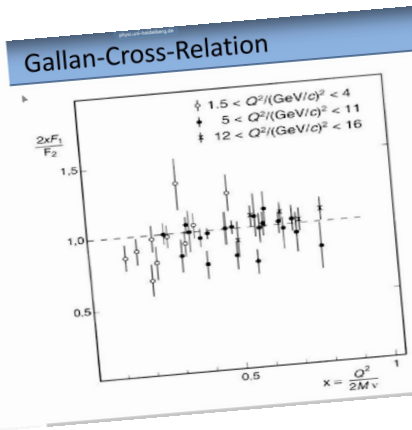
asıllığı olsun

X)

Parton Modeli



- $f_i(\xi)$: i pa (PDF). Bu



silığı olsun

x)

- **Rezonans:** kararsız olup, detektöre gelmeden önce bozunan parçacıklar
- Örnek: hiç bir Higgs parçacığını doğrudan detektörde görmedik!

N : kararsız parçacıkların sayısı olsun.

Eğer, bütün parçacıklar birbirlerinden bağımsız bozunuyorlarsa

$$\frac{1}{N} \frac{dN}{dt} = -\Gamma$$

olmalıdır. Burada Γ bozunma katsayısıdır. Dolayısıyla

$$N(t) = N(0)e^{-\Gamma t}$$

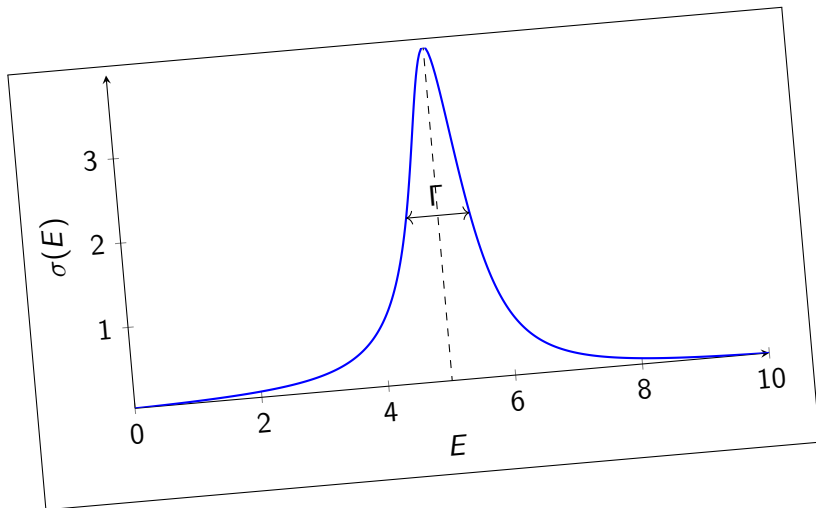
olacaktır. Böyle parçacıkların yarılanma ömrü: $t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\Gamma}$ olacaktır.

- $N \propto |\psi(t)|^2 \implies |\psi(t)| \propto e^{-\frac{\Gamma}{2}t}$
- $\psi(t) = \psi(0)e^{-iE_R t - \frac{\Gamma}{2}t}$
- Enerji uzayında:

$$\chi(E) = \int \psi(t) e^{iEt} dt = \frac{K}{(E - E_R) - i\Gamma/2}$$

- $\sigma(A + B \rightarrow R \rightarrow C + D) \propto |\chi(E)|^2 \propto \frac{\Gamma^2/4}{(E - E_R)^2 + \Gamma^2/4}$ (Breit-Wigner rezonance şekli)
- Göreli genelleştirilmesi: $\sigma \propto \frac{M_0^2 \Gamma^2}{(s - M_0^2)^2 + \Gamma^2 M_0^2}$

Rezonanslar



Ders II'nin sonu

Ders II'nin sonu...