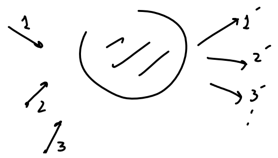
مروری بسیار کوتاه بر S_matrix



$t=-\infty$ $\qquad\qquad$ $t=\infty$

$$S = {}_{out}\langle 1' 2' \dots m \,|\, 1, 2, 3 \dots n\rangle_{in} = \mathbb{1} + iT$$

یکانی بودن ماتریس S

$$SS^{+} = \mathbb{1}$$

$${}_{out}\langle 1', \dots |\, iT \,|\, 1, \dots, n\rangle_{in} = (2\pi)^4 \delta^4\left(\sum_{in} p_i - \sum_{f} p_f\right) i\,\mathcal{M}$$

$\mathcal{M}$ ← دامنه

$P_A + P_B \longrightarrow P_1 + P_2$

سطح مقطع برخورد

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{CM} = \frac{1}{2E_A 2E_B}\,\frac{1}{|v_A - v_B|}\,\frac{|\vec{P}_1|}{(2\pi)^2 4E_{c.m}}\,|\mathcal{M}(P_A + P_B \to P_1 + P_2)|^2$$

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{CM} = \frac{|\mathcal{M}|^2}{64\pi^2 E_{cm}^2} \qquad \longleftarrow \text{برای ذرات مشابه}$$

$|v_A - v_B| \rightarrow$ سرعت نسبی در دستگاه آزمایش

$\xrightarrow{v_A}$

$\xleftrightarrow[v_A]{}$

تعداد پراکندگی

$$\frac{dN}{d\Omega} = N_A N_B v_A \frac{d\sigma}{d\Omega}$$

یادآوری

$$\begin{bmatrix} \gamma & 0 & 0 & \gamma v \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ v\gamma & 0 & 0 & \gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t \\ x \\ y \\ z \end{bmatrix}$$

$t \to t'$ $\qquad$ اما $\qquad$ $x' = x$

$z \to z'$ $\qquad\qquad\quad$ $y' = y$

$$\sigma_{tot} = \int \underbrace{\frac{d\sigma}{d\Omega}}_{\text{سطح مقطع برخورد جزئی}} d\Omega$$

آیا σ_{tot} ناوردای لورنتس است؟

مسأله: در ال-اچ-سی سطح مقطع برخورد برای سیگنال خاص 1 fb است. پیش‌زمینه (background) 1 nb است

برای کشف با ۵ درجه‌ی اعتماد چه‌قدر درخشندگی کل (Integrated Luminosity) لازم داریم.

$\sigma_s = 1\,fb \qquad \sigma_b = 1\,n$

$$\frac{L\sigma_s}{\sqrt{L\sigma_b}} \gtrsim 5$$

افت و خیز آماری با $\sqrt{N}$ داده می‌شود

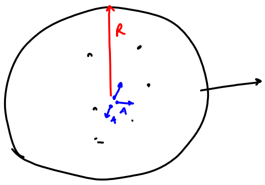
این یعنی تعداد سیگنال از ۵ برابر افت و خیز پیش زمینه باید بیشتر باشد.

$$L > 25\frac{\sigma_b}{\sigma_s} = 25 \times \frac{10^{-9}}{10^{-15}}\ fb^{-1} = 25\times 10^{6}\ fb^{-1}$$

کل درخشندگی ال-اچ-سی از $100\ fb^{-1}$ کمتر خواهد بود

بنابراین شانسی برای کشف این سیگنال نیست

* تمرین



چگالی ρ

از اتم هیدروژن تشکیل شده

$$\sigma_{tot}(A+p)$$

شرط به دام افتادن

$$\frac{\rho}{m_p}\times\sigma_{tot}\times R \gg 1$$

مسافت پویش آزاد میانگین $= \frac{1}{n\sigma}$

آهنگ برخورد $= vn\sigma$

واپاشی تک ذره

$$A \to f$$

$$d\Gamma = \frac{1}{2m_A}\left(\prod_f \frac{d^3p_f}{(2\pi)^3}\frac{1}{2E_f}\right)|\mathcal{M}|^2(2\pi)^4\,\delta^4\Big(p_A - \sum_f p_f\Big)$$

در دستگاه سکون

چگونه دامنه را حساب کنیم؛

$$_{out}\langle \cdots | S | \cdots \rangle_{in} = \lim_{T\to\infty} {}_{out}\langle \cdots | e^{-iH(2T)} | \cdots\rangle_{in}$$

$$\mathcal{L} = K - \underset{\sim}{V}$$

$$_{out}\langle \;| -iV \cdots -iV \;| \cdots\rangle_{in}$$

$$\varphi_1 \quad \varphi_2 \;, \;\cdots\; \varphi_n$$

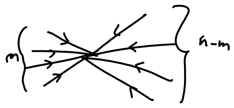
$$\varphi = \int\frac{d^3k}{(2\pi)^3}\frac{1}{\sqrt{2\omega_k}}\left(e^{ik\cdot x}a_k^{+} \quad e^{-ik\cdot x}a_k^{c+}\right)$$

$$V = \lambda\, \underset{a_1}{\varphi_1}\,\underset{a_2}{\varphi_2}\cdots\underset{a_m}{\varphi_m}\,\underset{(a^c_{m+1})^{+}}{\varphi_{m+1}}\cdots\underset{a^{c+}_n}{\varphi_n} + H.c.$$

$$|\;\rangle \quad |\varphi(k)\quad \varphi(k)\rangle$$

$| \rangle_{in} = |\varphi_1(k_1) \ldots \varphi_m(k_m)\rangle$

$| \rangle_{out} = |\bar{\varphi}_{m+1}(k_{m+1}) \ldots \bar{\varphi}_n(k_n)\rangle$

$\mathcal{M} = \lambda$ 

$V = \underbrace{\lambda \varphi_1 \varphi_2 \varphi_3}_{V_1} + \underbrace{\lambda' \varphi_4 \varphi_5 \varphi_6}_{V_2} + H.c.$

$\varphi_1 + \varphi_2 \to \varphi_5 + \varphi_6$?

$\varphi_1 \varphi_2 \varphi_3 \, |\varphi_1 \varphi_2\rangle = |\bar{\varphi}_3\rangle$

$\langle \varphi_5 \varphi_6 | \varphi_4^\dagger \varphi_5^\dagger \varphi_6^\dagger = \langle \bar{\varphi}_4 |$

مراتب بالاتر؟

تقارن

$\varphi_1 \to e^{2i\frac{\pi}{3}} \varphi_1$ $\qquad \varphi_4 \to \varphi_4$

$\varphi_2 \to e^{2i\frac{\pi}{3}} \varphi_2$ $\qquad \varphi_5 \to \varphi_5$ $\qquad V \to V$

$\varphi_3 = e^{i2\frac{\pi}{3}} \varphi_3$ $\qquad \varphi_6 \to \varphi_6$

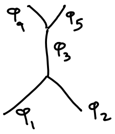
$\varphi_1 + \varphi_2 \to \varphi_5 + \varphi_6$ تحت این تبدیل ناوردا نیست.

$\cancel{\varphi_1 + \varphi_2 \to \varphi_5 + \varphi_6}$

$V = \underbrace{g_1 \varphi_1 \varphi_2 \varphi_3}_{V_1} + \underbrace{g_1^* \varphi_1^\dagger \varphi_2^\dagger \varphi_3^\dagger}_{V_1^\dagger} + \underbrace{g_2 \varphi_3 \varphi_4 \varphi_5}_{V_2} + \underbrace{g_2^* \varphi_3^\dagger \varphi_4^\dagger \varphi_5^\dagger}_{V_2^\dagger}$

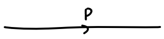
$V_2^\dagger V_1 |\varphi_1 \varphi_2\rangle \propto |\varphi_4 \varphi_5\rangle$

$\varphi_1 + \varphi_2 \to \varphi_4 \varphi_5$

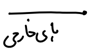


$$i\mathcal{M} = \frac{i}{q^2 - m_3^2 + i\varepsilon} (-ig_1)(-ig_2^*)$$

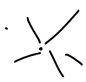
$q = P_1 + P_2$



$\frac{i}{P^2 - m^2}$

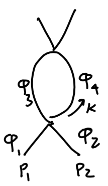


1


$-iV$

$V = g_1 \varphi_1 \varphi_2 \varphi_3 \varphi_4 + g_2 \varphi_3 \varphi_4 \varphi_5 \varphi_6 + H.c.$

حلقه



$$\mathcal{M} = \int \frac{d^4k}{(2\pi)^4} \frac{i}{k^2 - m_4^2} \frac{i}{(P_1 + P_2 - k)^2 - m_3^2} (-ig_1)(-ig_2^*)$$

$$d^4k = \Omega_{4D}\, k^3 dk = \underbrace{2\pi^2}\, k^3 dk$$

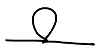
Loop - suppression $\sim \dfrac{g^2}{16\pi^2}$

فاکتورهای تقارن

$V = \lambda \dfrac{\varphi^4}{4!}$ $\qquad \varphi\varphi\varphi\varphi \;|\varphi(k_1)\varphi(k_2)\varphi(k_3)\varphi(k_4)\rangle$

$= 4!$

$\langle \varphi(k_2)|\varphi\varphi\varphi\varphi|\varphi(k_1)\rangle = 4\times 3$



$\dfrac{4\times 3}{4!} = \dfrac{1}{2}$

$\varphi\varphi\varphi\varphi \qquad 3$

$\dfrac{3}{4!} = \dfrac{1}{8}$

به صفحات ۹۲ و ۹۳ پسکین مراجعه کنید.

(در امتحان میان ترم یک سؤال مربوط خواهم پرسید)

فرمیون ها

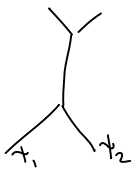
——— u

پادذره ——— v

داخلی ——— $i\dfrac{\not p + m}{p^2 - m^2 + i\varepsilon}$

$V = \lambda \bar\psi_2 \psi_1 \varphi$

$\psi_1(k_1)\,\bar\psi_2(k_2) \longrightarrow \psi_1(k_3)\,\bar\psi_2(k_4)$



$iM = (-i\lambda)(-i\lambda^*)\dfrac{i}{s - m_\varphi^2}$

$\overbrace{\bar v(k_2)\, u_1(k_1)}^{\text{عدد}} \qquad \underbrace{\bar u_1(k_3)\, v_2(k_4)}_{\text{عدد}}$

$[\,-\,-\,-\,]\,\gamma^0 \begin{bmatrix} - \\ - \\ - \end{bmatrix}$

$\sum |M|^2$

جمع روی اسپین

$\bar v_2(k_2)\, u_1(k_1) = v_2^\dagger \gamma^0 u_1$

$\bar v_2 u_1 (\bar v_2 u_1)^* = \bar v_2 u_1 \bar u_1 v_2 = \mathrm{Tr}(u_1 \bar u_1 v_2 \bar v_2)$

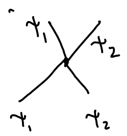
$$u^s(p) = \begin{pmatrix} \sqrt{p\cdot\sigma}\,\xi^s \\ \sqrt{p\cdot\bar\sigma}\,\xi^s \end{pmatrix} \qquad v^s = \begin{pmatrix} \sqrt{p\cdot\sigma}\,\eta^s \\ -\sqrt{p\cdot\bar\sigma}\,\eta^s \end{pmatrix}$$

$$\sum_s u^s \bar u^s = \begin{pmatrix} m & p\cdot\sigma \\ p\cdot\bar\sigma & m \end{pmatrix} = \gamma\cdot p + m$$

$$\sum_s v^s \bar v^s = \begin{pmatrix} -m & p\cdot\sigma \\ p\cdot\bar\sigma & -m \end{pmatrix} = \gamma\cdot p - m$$

لاگرانژی مؤثر

$s \ll m_\varphi$



$$-\frac{i\lambda\lambda'}{m_\varphi^2} \qquad \bar\psi_1\psi_2(\bar\psi_1\psi_2)^\dagger$$

Polarization

ϵ^μ

خارجی ←

$$\text{داخلی} \quad -i\,\frac{\eta_{\mu\nu} - \frac{q_\mu q_\nu}{M_V^2}}{q^2 - m_V^2}$$

Weak interactions

β-decay of Nuclei

از زمان بکرل شناخته شده بود

α- decay و β-decay را درسال ۱۸۹۷

معرفی کرده بود.

توصیف نظری واپاشی β درسال ۱۹۳۳ توسط فرمی ارائه شد.

طی دو دهه ی بعد تر و تمیزتر شد.

لی ۱۹۵۷ خانم Wu نقض پاریته

Lee Yang

فاینمن گلمان مارشاک سودارشان

V − A − structure

$$\bar\psi\,\gamma^\mu(1-\gamma^5)\,\psi'$$

β- decay

$$n \longrightarrow p + e^- + \bar\nu_e$$

ذره اسپین صفر $\longrightarrow \underbrace{\pi\,\pi\,\pi}$

$$M(\vec p_1\cdot\vec p_2,\ \vec p_2\cdot\vec p_3,\ \vec p_1\cdot\vec p_3)$$

$$\vec p_1\cdot(\vec p_2\times\vec p_3) = 0$$

تقارن دورانی

$$\vec{P}_1 + \vec{P}_2 + \vec{P}_3 = 0$$

پاریته $(-1)^3 = -1$

ذره‌ای اسپین صفر $\longrightarrow \pi\pi$

پاریته $(-1)^2 = 1$

τ, θ هم جرم بودند

Lee Yang ۱۹۵۶ $\longrightarrow$ ~~Parity~~

ذره مزبور همان K^+ بود.

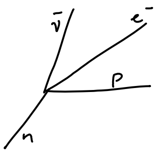
$$Br(K^+ \to \pi^+\pi^0) = 21\%$$

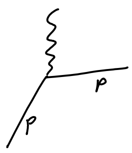
$$Br(K^+ \to \pi^+\pi^+\pi^-) = 5.6\%$$

Wu et al.

$$^{60}Co \longrightarrow {}^{60}Ni + e^- + \bar{\nu}$$

Road to Current-Current V-A interaction





$G j_\mu^{(n\to p)} j^\mu_{(\nu e)}$ $\qquad$ $e j_\mu^{(em)} A^\mu$

$$j_\mu^{(em)} = \bar{u}_p \gamma_\mu u_p$$

$$H_w = \sum_i \frac{G_i}{2} \left[\bar{\psi}_p O_i \psi_n\right]\left[\bar{\psi}_e O_i (1 + c_i\gamma_5)\psi_\nu\right] + h.c.$$

1	$O_S = 1$	scalar (S)
4	$O_V = \gamma_\mu$	Vector (V)
+ 6	$O_T = \frac{i}{2}(\gamma_\mu\gamma_\nu - \gamma_\nu\gamma_\mu)$	Tensor (T)
4	$O_A = \gamma_5\gamma_\mu$	Axial vector (A)
1	$O_P = \gamma_5$	Pseudoscalar (P)
16		

پایه‌ی کامل برای ماتریس هرمیتی ۴×۴

ماتریس کلی ۴×۴ $\qquad \underbrace{G_i}_{\text{Complex}} O_i$

$H_w \rightarrow$ کلی‌ترین حالت ناوردا تحت لورنتس

$G_i = G_s$

$C_0 \Uparrow \downarrow$ $\qquad c = \pm 1$

Maximal parity violation

آیا به این طریق می‌توان تشخیص داد $c=1$ یا $c=-1$ ؟
موعد تحویل در هفته بعد

تحت C، P و T چگونه $\bar{\psi}_2 O_i \psi_1$
تبدیل می‌شود. موعد تحویل ۱ هفته بعد

نوتاسیون کتاب با پسکین فرق دارد پس بخش ۲.۱.۲.۱
را نخوانید!

$$u = \begin{pmatrix} \sqrt{p\cdot\sigma}\,\xi \\ \sqrt{p\cdot\bar{\sigma}}\,\xi \end{pmatrix} \qquad v = \begin{pmatrix} \sqrt{p\cdot\sigma}\,\xi \\ -\sqrt{p\cdot\bar{\sigma}}\,\xi \end{pmatrix}$$

$$\gamma^0 = \begin{bmatrix} 0 & \mathbb{1} \\ \mathbb{1} & 0 \end{bmatrix} \qquad \gamma^1 = \begin{bmatrix} 0 & \sigma^1 \\ -\sigma^1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\gamma^2 = \begin{bmatrix} 0 & \sigma^2 \\ -\sigma^2 & 0 \end{bmatrix} \qquad \gamma^3 = \begin{bmatrix} 0 & \sigma^3 \\ -\sigma^3 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\sigma^1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \qquad \sigma^2 = \begin{bmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{bmatrix} \qquad \sigma^3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}$$

$$\gamma^5 = i\gamma^0\gamma^1\gamma^2\gamma^3 = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\underbrace{P_L = \frac{1-\gamma^5}{2}}_{\text{Projection}} \qquad \underbrace{P_R = \frac{1+\gamma^5}{2}}_{\text{matrices}}$$

$$\underset{\text{ماتریس هلیسیتی}}{h} = \frac{\vec{\sigma}\cdot\vec{p}}{2p} \qquad P_L\psi = \psi_L \qquad P_R\psi = \psi_R$$

معادله‌ی حرکت $\qquad (\gamma^\mu p_\mu - m)\psi = 0$

$$m \to 0 \qquad p_\mu = (p, 0, 0, p)$$

$$\gamma^\mu p_\mu = p\left(\begin{bmatrix} 0 & \mathbb{1} \\ \mathbb{1} & 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & \sigma_3 \\ -\sigma_3 & 0 \end{bmatrix}\right) =$$

$$p\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 \\ 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\sqrt{p.\sigma} = \sqrt{p\left(\begin{bmatrix}1&0\\0&1\end{bmatrix}-\begin{bmatrix}1&0\\0&-1\end{bmatrix}\right)} = \sqrt{2p}\begin{bmatrix}0&0\\0&1\end{bmatrix}$$

$$\sqrt{p.\bar{\sigma}} = \sqrt{p\left(\begin{bmatrix}1&0\\0&1\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}1&0\\0&-1\end{bmatrix}\right)} = \sqrt{2p}\begin{bmatrix}1&0\\0&0\end{bmatrix}$$

$$\psi = \sqrt{2p}\begin{pmatrix}0\\ \xi_2\\ \xi_1\\ 0\end{pmatrix}$$

$$\xi = \begin{pmatrix}\xi_1\\ \xi_2\end{pmatrix} \qquad |\xi_1|^2 + |\xi_2|^2 = 1$$

$$p.\gamma\,\psi_L = 0 \qquad p.\gamma\,\psi_R = 0$$

درحد $m=0$ ، ψ_L و ψ_R با معادله حرکت مربوط نمی‌شوند

$$\psi_L = \sqrt{2p}\begin{bmatrix}0\\1\\0\\0\end{bmatrix} \qquad \psi_R = \sqrt{2p}\begin{bmatrix}0\\0\\1\\0\end{bmatrix}$$

$$h = \frac{\vec{p}.\vec{\sigma}}{2|\vec{p}|} \qquad h\psi_L = -\frac{\psi_L}{2} \qquad h\psi_R = \frac{\psi_R}{2}$$

Observation of electron helicity in the β-decay

Fravenfelder ۱۹۵۷

$$^{60}Co \longrightarrow {}^{60}Ni + e^- + \bar{\nu}_e$$

مشاهده e بیرون آمده چپ‌دست است.

$$\psi_e \to \frac{1-\gamma_5}{2}\psi_e \qquad \psi_e^{+} \to \psi_e^{+}\frac{1-\gamma_5}{2}$$

$$\gamma_0\gamma_5 = -\gamma_5\gamma_0 \qquad \bar{\psi}_e \to \bar{\psi}_e\frac{1+\gamma_5}{2}$$

$$\bar{\psi}_e O_i (1+C_i\gamma_5)\psi_\nu \to \bar{\psi}_e \frac{1+\gamma_5}{2} O_i (1+C_i\gamma_5)\psi_\nu$$

$i = V, A \to -1$

$i = S, T, P \to +$

$$= \bar{\psi}_e O_i \frac{1\mp\gamma_5}{2}(1+C_i\gamma_5)\psi_\nu$$

$$= \bar{\psi}_e O_i (1\mp C_i)\left(\frac{1\mp\gamma_5}{2}\right)\psi_\nu$$

$V, A \to C_i = -1$ نوترینوی چپ دست

$S, T, P \to C_i = 1$ 〃 راست‌دست

تعین هلیسیتی نوترینو

1958 Golhaber

$$^{152}Eu(J^P = 0^-) + e^- \longrightarrow {}^{152}Sm^*(1^-) + \nu \to {}^{152}Sm(0^+) + \gamma + \nu$$

$$^{152}Eu(0^-) + e^- \longrightarrow {}^{152}Sm(0^+) + \gamma + \nu$$

(i)	0	$-\frac{1}{2}$	0	-1	$\frac{1}{2}$	فوتون‌های
(ii)	0	$+\frac{1}{2}$	0	1	$-\frac{1}{2}$	درجهت Sm هستند

قطبش ۲ = ۱+ قطبش دایره‌ای چپ‌گرد
left-circularly polarized

توجه

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

$$F_{\mu\nu} = \begin{bmatrix} 0 & E_1 & E_2 & E_3 \\ -E_1 & 0 & B_3 & -B_2 \\ -E_2 & -B_3 & 0 & B_1 \\ -E_3 & +B_2 & -B_1 & 0 \end{bmatrix} \leftarrow$$

علامت E را چک کنید. *

$\varepsilon_\mu : (0, 0, 1, 0)$ $\qquad \vec{k} = (k, 0, 0, k)$

$\vec{E}(t, x)$ $\qquad \vec{B}(t, x)$ $\qquad$ بدست بیاورید

V-A type; i.e. $\bar{\psi}_e \gamma^\mu (1-\gamma_5) \psi_\nu$

$$N \to N' \, e \, \bar{\nu}$$

گذار فرمی : $\qquad e\bar{\nu} \qquad S = 0$

گذار گاموف-تلر $\qquad e^- \bar{\nu} \qquad S = 1$

درجه غیرنسبیتی N و N'

گذار فرمی $\qquad O_i = S, V$

گذار گاموف-تلر $\qquad O_i = T, A$

$$H_w = \frac{G_V}{2} \left[\bar{\psi}_p \gamma_\mu \psi_n\right]\left[\bar{\psi}_e \gamma^\mu (1-\gamma_5) \psi_\nu\right]$$
$$+ \frac{G_A}{2} \left[\bar{\psi}_p \gamma_5 \gamma_\mu \psi_n\right]\left[\bar{\psi}_e \gamma^\mu (1-\gamma_5) \psi_\nu\right] + H.C.$$

$$^{16}O(0^+) \longrightarrow {}^{14}N(0^+) + e^+ + \nu$$

گذار فرمی ــــ فقط از G_V سهم می‌گیرد.

$$G_p = \frac{G_V}{\sqrt{2}} \qquad G_\beta = 1.147 \times 10^{-5}\ GeV^{-2}$$

$$n \longrightarrow p + e\,\bar{\nu}_e \qquad \left|\frac{G_A}{G_V}\right| = 1.26$$

ناقطبیده

علامت نسبی G_A و G_V با مطالعه‌ی واپاشی n قطبیده به دست می‌آید:

$\Uparrow n$

$$\psi_n = \begin{bmatrix} \sqrt{\sigma\cdot p}\ \chi_n \\ \sqrt{p\cdot\bar\sigma}\ \chi_n \end{bmatrix} \simeq \sqrt{m_n}\begin{bmatrix}\chi_n \\ \chi_n\end{bmatrix}$$

$$\psi_p = \begin{bmatrix} \sqrt{p\cdot\sigma}\ \chi_p \\ \sqrt{p\cdot\bar\sigma}\ \chi_p \end{bmatrix} \simeq \sqrt{m_p}\begin{bmatrix}\chi_p \\ \chi_p\end{bmatrix}$$

$$\bar\psi_p \gamma_0 \psi_n \propto \chi_p^{\dagger}\chi_n$$

$$\bar\psi_p \gamma^i \psi_n \simeq \sqrt{m_n m_p}\,(\chi_p^\dagger\ \ \chi_p^\dagger)\begin{bmatrix} & -\sigma^i \\ \sigma^i & \end{bmatrix}\begin{bmatrix}\chi_n \\ \chi_n\end{bmatrix}$$

$$= 0 + O\left(\frac{v}{c}\right)$$

$$H_w = G_V\,(\chi_p^\dagger\chi_n)\,(l_e^\dagger l_\nu) + G_A\,(\chi_p^\dagger\vec\sigma\chi_n)(l_e^\dagger\vec\sigma l_\nu)$$

$+ H.c.$ $\qquad \sigma_1 = \begin{bmatrix}0 & 1\\ 1 & 0\end{bmatrix} \quad \sigma_2 = \begin{bmatrix}0 & -i\\ i & 0\end{bmatrix} \quad \sigma_3 = \begin{bmatrix}1 & 0\\ 0 & -1\end{bmatrix}$

$$\underbrace{\Uparrow n \longrightarrow \Uparrow p + \underset{e^-}{\downarrow}\Uparrow + \underset{\bar\nu_e}{\downarrow}\Downarrow \qquad n\Uparrow \longrightarrow p\Uparrow + \bar e\uparrow\Downarrow + \bar\nu_e\uparrow\Uparrow}_{\text{Fermi}}$$

(a) $\qquad\qquad$ (b)

$$\text{(c)}\quad \underbrace{\Uparrow n \longrightarrow \Downarrow p + e^-\downarrow\Uparrow + \bar\nu_e\uparrow\Uparrow}_{\text{Gamow-Teller}}$$

$$M^{(a)} = (G_V + G_A)\,F$$

$$M^{(b)} = (G_V - G_A)\,F$$

$$M^{(c)} = 2\,G_A\,F$$

$$P(\vec\sigma\uparrow\ \vec P_e\uparrow) = |M^{(b)}|^2 = |G_V - G_A|^2|F|^2$$

$$P(\vec\sigma\uparrow\ \vec P_e\downarrow) = |M^{(a)}|^2 + |M^{(c)}|^2 = |G_V + G_A|^2|F|^2 + 4|G_A|^2|F|^2$$

P $\qquad P(\vec\sigma\uparrow\vec P_e\uparrow) \simeq P(\vec\sigma\uparrow\ \vec P_e\downarrow)$ $\qquad$: توجه

$$H_w = \frac{G_\beta}{\sqrt2}\left[\bar\psi_p\gamma_\mu(1-g_A\gamma_5)\psi_n\right]\left[\bar\psi_e\gamma^\mu(1-\gamma_5)\psi_\nu\right] + H.c.$$

$$g_A = -\frac{G_A}{G_V} \simeq 1.26$$

* تمرین های ۲.۱ ، ۲.۲ ، ۲.۳

Lepton current universality

$$\mu^- \longrightarrow e^-\ \bar\nu_e\ \nu_\mu \qquad \tau_\mu = 2.2\times10^{-6}\ \text{sec}$$

$$\cancel{\mu^- \to e\gamma}$$

$$J_\mu^{(l)} = J_\mu^{(e)} + J_\mu^{(\mu)} + J_\mu^{(\tau)} =$$

$\bar{\nu}_e \gamma_\mu (1-\gamma_5) e + \bar{\nu}_\mu \gamma_\mu (1-\gamma_5) \mu + \bar{\nu}_\tau \gamma_\mu (1-\gamma_5) \tau$

تعریف e، μ، τ

تعریف ν_e، ν_μ، ν_τ

μ-decay

$$\underset{m}{X} \longrightarrow A + B + C$$

$$\begin{cases} m = E_A + E_B + E_C \\ 0 = \vec{P}_A + \vec{P}_B + \vec{P}_C \end{cases}$$

$$E_A^2 = (m - E_B - E_C)^2 = m_A^2 + P_A^2 = m_A^2 + (\vec{P}_B + \vec{P}_C)^2$$

$$= m_A^2 + P_B^2 + P_C^2 + 2\vec{P}_B \cdot \vec{P}_C = m^2 + E_B^2 + E_C^2 + 2E_BE_C$$
$$-2mE_B - 2mE_C$$

$$E_c = \sqrt{P_c^2 + m_c^2}$$

$$4P_C^2\left((m-E_B)^2 - P_B^2\cos^2\theta\right) + 4P_BP_C\cos\theta\left(m^2 + m_B^2 + m_C^2 - m_A^2 - 2mE_B\right) + 4m_c^2(m-E_B)^2 - (m^2 + m_B^2 + m_C^2 - m_A^2 - 2mE_B)^2 = 0$$

معادله درجه ۲

P_c را بدست میاوریم

کمترین مقدار $P_c = 0$

Last modified by: fsc

به ازای P_B مشخص

به ازای $\cos\theta = \pm 1$ ماکزیمم و مینیمم

$\mu \to e\,\bar{\nu}_e\,\nu_\mu \qquad m_A, m_B, m_C \ll m$

$$4P_c^2\left((m-P_B)^2 - P_B^2\cos^2\theta\right) + 4P_BP_c\cos\theta\,(m^2 - 2mP_B) - m^2(m-2P_B)^2 = 0$$

$\cos\theta = 1$

$$P_c = \frac{-4P_Bm(m-2P_B) \pm \sqrt{16P_B^2(m)^2(m-2P_B)^2 + 16m^3(m-2P_B)^3}}{8m(m-2P_B)}$$

$$= \frac{-P_Bm(m-2P_B) \pm m(m-2P_B)(m-P_B)}{2m(m-2P_B)} = \frac{m}{2} - \frac{P_B}{}$$

$\cos\theta = -1$

$$P_c = \frac{4P_B m(m-2P_B) \pm \sqrt{16P_B^2 m^2 (m-2P_B)^2 + 16m^2(m-2P_B)}}{8m(m-2P_B)}$$

$$= \frac{m}{2}$$

$$\frac{m}{2} - P_B \leqslant P_c \leqslant \frac{m}{2}$$

همین طور $P_B \leqslant \frac{m}{2}$ بنابراین اگر P_B را مشخص نکنیم

$$0 \leqslant P_c \leqslant \frac{m}{2}$$

$$d\Gamma = \frac{1}{2E_\mu} \overline{|M|^2} \, dR$$

$$dR = \frac{d^3\vec{P}_e}{(2\pi)^3 2E_e} \frac{d^3k_{\nu_e}}{(2\pi)^3 2\omega_{\nu_e}} \frac{d^3k_{\nu_\mu}}{(2\pi)^3 2\omega_{\nu_\mu}} (2\pi)^4 \delta^4(P_\mu - P_e - k_{\nu_\mu} - k_{\nu_e})$$

$$= \frac{1}{(2\pi)^5} \frac{d^3\vec{P}_e}{2E_e} \frac{d^3\vec{k}_{\nu_e}}{2\omega_{\nu_e}} \theta(E_\mu - E_e - \omega_{\nu_e}) \, \delta\big((\underbrace{P_\mu - P_e - k_{\nu_e}}_{\text{چهار تکانه}})^2\big)$$

$$\theta(E_\mu - E_e - \omega_{\nu_e}) \, \delta\Big((E_\mu - E_e - \omega_{\nu_e})^2 - (\underbrace{\vec{k}_\mu - \vec{k}_e - \vec{k}_{\nu_e}}_{\vec{k}_{\nu_\mu}})^2\Big)$$

$$= \theta(E_\mu - E_e - \omega_{\nu_e}) \, \delta\Big((E_\mu - E_e - \omega_{\nu_e} - |\vec{k}_{\nu_\mu}|)\,(\underbrace{E_\mu - E_e - \omega_{\nu_e} + |\vec{k}_{\nu_\mu}|}_{\text{نمی‌تواند 0 شود}})\Big)$$

$$\left(\delta(f) = \frac{\delta(x - x_0)}{|f'|} \quad \text{where} \quad f(x_0) = 0\right.$$

$$\frac{\delta(E_\mu - E_e - \omega_{\nu_e} - \omega_{\nu_\mu})}{2\omega_{\nu_\mu}}$$

$$\overline{|M|^2} = \frac{1}{2} \sum_{spin} |M|^2$$

متوسط گیری روی اسپین های اولیه
جمع روی اسپین ذرات نهایی

$$\mu^- \to e^- \bar{\nu}_e \, \nu_\mu \qquad V = \frac{G_\mu}{\sqrt{2}} J_\mu^{(\mu)} \left(J^{(e)\mu}\right)^\dagger$$

$$J_\mu^{(\mu)} = \bar{\nu}_\mu \gamma_\mu (1-\gamma_5)\mu \qquad J_\mu^{(e)} = \bar{\nu}_e \gamma_\mu (1-\gamma_5) e$$

$$\mathcal{M} = i \frac{G_\mu}{\sqrt{2}} \underbrace{\left[\bar{u}(k_{\nu_\mu}) \gamma_\rho (1-\gamma_5) u(p_\mu)\right]}_{\text{عدد}} \left[\bar{u}(p_e) \gamma^\rho (1-\gamma_5) v(k_{\nu_e})\right]$$

[illegible]

$A \to$ عدد $\qquad A^* = A^\dagger \qquad A = BCD \qquad A^* = D^\dagger C^\dagger B^\dagger$

$$\frac{1}{2} \sum_{spin} |M|^2 = \qquad \boxed{\cancel{k} = k^\mu \gamma_\mu \quad \text{نمادگذاری}}$$

$$\frac{1}{2} \frac{G_\mu^2}{2} \sum_{spin} \left[\bar{u}(k_{\nu_\mu}) \gamma_\rho (1-\gamma_5) u(p_\mu) \bar{u}(p_\mu) \gamma_\sigma (1-\gamma_5) u(k_{\nu_\mu})\right]$$

$$\times \sum_{spin} \left[\bar{u}(p_e) \gamma^\rho (1-\gamma_5) v(k_{\nu_e}) \bar{v}(k_{\nu_e}) \gamma^\sigma (1-\gamma_5) u(p_e)\right]$$

$$= \frac{G_\mu^2}{4} \mathrm{Tr}\left[\cancel{k}_{\nu_\mu} \gamma_\rho (1-\gamma_5)(\cancel{p}_\mu - m_\mu) \gamma_\rho (1-\gamma_5)\right] \times$$

$$= \frac{G_\mu^2}{4} \mathrm{Tr}\left[\not{k}_{\nu_\mu} \gamma_\rho (1-\gamma_5)(\not{p}_\mu - m_\mu)\gamma_\sigma(1-\gamma_5)\right] \times$$
$$\mathrm{Tr}\left[\not{p}_e \gamma^\rho (1-\gamma_5) \not{k}_{\nu_e} \gamma^\sigma (1-\gamma_5)\right]$$

$$= 64\, G_\mu^2 \, (k_{\nu_e}\cdot p_\mu)\,(k_{\nu_\mu}\cdot p_e)$$

$$\sum_s u^s \bar{u}^s = \not{k} + m \qquad \sum_s v^s \bar{v}^s = \not{k} - m$$

$$m_\nu \lll m_e \ll m_\mu$$

$$\left.\begin{array}{l} p_\mu = (m_\mu, 0, 0, 0) \\ k_{\nu_e} = (\omega_{\nu_e}, 0, 0, \omega_{\nu_e}) \end{array}\right\} \quad p_\mu \cdot k_{\nu_e} = m_\mu \omega_{\nu_e}$$

$$k_{\nu_\mu}\cdot p_e = \frac{(k_{\nu_\mu}+p_e)^2 - \cancelto{m_e^2}{p_e^2} - \cancelto{m_{\nu_\mu}^2}{k_{\nu_\mu}^2}}{2} = \frac{(p_\mu - k_{\nu_e})^2}{2}$$

$$= m_\mu^2 - 2k_{\nu_e}\cdot p_\mu = m_\mu^2 - 2m_\mu \omega_{\nu_e}$$

(2.36 در کتاب یک اشتباه تایپی هست (بالای معادله

$$d\Gamma = \frac{G_\mu^2}{2m_\mu \pi^5} \frac{d^3p_e}{2E_e} \frac{d^3k_{\nu_e}}{2\omega_{\nu_e}} m_\mu \omega_{\nu_e} (m_\mu^2 - 2m_\mu \omega_{\nu_e})$$
$$\times\, \delta\left(m_\mu^2 - 2m_\mu E_e - 2m_\mu \omega_{\nu_e} + 2E_e \omega_{\nu_e}(1-\cos\theta)\right)$$

$$d^3p_e\, d^3k_{\nu_e} = 4\pi E_e^2 dE_e\, (2\pi)\omega_{\nu_e}^2 d\omega_{\nu_e}\, d\cos\theta$$

$$\frac{d\Gamma}{dE_e} = \int_{\frac{m_\mu}{2}-E_e}^{\frac{m_\mu}{2}} \frac{d\Gamma}{dE_e\, d\omega_{\nu_e}} d\omega_{\nu_e} = \frac{G_\mu^2 m_\mu^2 E_e^2}{4\pi^3}\left(1 - \frac{4}{3}\frac{E_e}{m_\mu}\right)$$

$$\Gamma = \tau_\mu^{-1} = \frac{G_\mu^2 m_\mu^2}{4\pi^3}\int_0^{\frac{m_\mu}{2}} dE_e\, E_e^2 \left(1 - \frac{4}{3}\frac{E_e}{m_\mu}\right) = \frac{G_\mu^2 m_\mu^5}{192\pi^3}$$

$$\tau_\mu \cong 2.2\times 10^{-6}\ \mathrm{sec} \Longrightarrow G_\mu = 1.166\times 10^{-5}\ \mathrm{GeV}^{-2}$$

$$G_\beta = 1.147\times 10^{-5}\ \mathrm{GeV}^{-2}$$ یادآوری

2٪ اختلاف

$$\Gamma(\tau^- \to e^- \bar{\nu}_e \nu_\tau) = \left(\frac{G_\mu}{G_\tau}\right)^2 \left(\frac{m_\mu}{m_\tau}\right)^5 \Gamma(\mu^- \to e^- \bar{\nu}_e \nu_\mu)$$

$$\frac{G_\tau}{G_\mu} = 1.001 \quad \rightarrow \quad \text{Universality}$$

$$\Gamma(\tau^- \to e^- \bar{\nu}_e \nu_\tau) = \tau_\tau^{-1}\, Br(\tau \to e^- \bar{\nu}_e \nu_\tau)$$

$$G_F = G_\mu$$

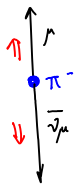
از اندازه گیری G_τ

را اندازه گیری G_F

واپاشی پایون

$$\pi^- \longrightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$$
$$e^- + \bar{\nu}_e$$

$$\frac{\Gamma(\pi^- \to e^- + \bar{\nu}_e)}{\Gamma(\pi^- \to \mu^- + \bar{\nu}_\mu)} = 1.23 \times 10^{-4}$$



مشاهده: μ^- هلیسیتی $+\frac{1}{2}$ دارد.

نتیجه: بقای تکانه (S-wave +)

$\bar{\nu}_\mu$ نیز هلیسیتی مثبت دارد.

$\bar{\nu}_\mu$ تکانه $= (k, 0, 0, k)$

$$u = \sqrt{2k}\begin{bmatrix} 0 \\ \xi_2 \\ \xi_1 \\ 0 \end{bmatrix} \qquad v = \sqrt{2k}\begin{bmatrix} 0 \\ \xi_2 \\ -\xi_1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$C\psi C = -i\gamma^2\psi^*$$

$$u \xrightarrow{C} \sqrt{2k}\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} 0 \\ \xi_2^* \\ -\xi_1^* \\ 0 \end{bmatrix} = \sqrt{2k}\begin{bmatrix} 0 \\ -\xi_1^* \\ \xi_2^* \\ 0 \end{bmatrix}$$

یعنی

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \xrightarrow{C} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

چپ دست

$h = -\frac{1}{2}$

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \xrightarrow{C} \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

راست دست

$h = \frac{1}{2}$

$$\left[\bar{\nu}_e \gamma_\mu (1-\gamma_5) e\right]^\dagger = e^\dagger (1-\gamma_5)\gamma_\mu^\dagger \gamma^{0\dagger} \nu_e$$

$$\gamma^{0\dagger} = \gamma^0 \qquad (\gamma^i)^\dagger = -\gamma^i$$

$$\gamma^0\gamma^0 = \gamma^0\gamma^0 \qquad \gamma^i\gamma^0 = -\gamma^0\gamma^i$$

$$\left[\bar{\nu}_e \gamma_\mu \frac{(1-\gamma_5)}{2} e\right]^\dagger = \bar{e}\gamma_\mu \underbrace{\frac{(1-\gamma_5)}{2}}\nu_e$$

$u_{\nu_e} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$ نوترینوی چپ دست را از بین می برد

$v_{\bar{\nu}_e} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$ آنتی نوترینوی راست-دست را به وجود می آورد

فصل ۵.۵ وابرگ ببینید

$$\sum_{\bar{\sigma}} u_{\hat{n}\pm}(0,\bar{\sigma})\, J^{(i)}_{\bar{\sigma}\sigma} = \sum_m \frac{1}{2}\sigma_{\hat{n}m}\, u_{m\pm}(0,\sigma)$$

$$-\sum_{\bar{\sigma}} v_{\hat{n}\pm}(0,\bar{\sigma})\, J^{(j)*}_{\bar{\sigma}\sigma} = \sum_m \frac{1}{2}\sigma_{\hat{n}m}\, v_{m\pm}(0,\sigma)$$

$k' = (k, 0, 0, k)$ ذره‌ی مایورانا

$$\psi = \begin{bmatrix} \psi_L \\ \psi_R \end{bmatrix} \qquad \psi_L = [\,\,]\, a_{\downarrow} + [\,\,]\, a^{c\dagger}_{\uparrow}$$

$$\psi_R = [\,\,]\, a_{\uparrow} + [\,\,]\, a^{c\dagger}_{\downarrow}$$

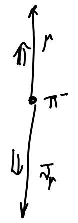
ذره‌ی مایورانا : $\psi^c = \psi$

$$\psi = -i\gamma^2 \psi^* \longrightarrow \begin{cases} a_{\downarrow} = a^c_{\downarrow} \\ a_{\uparrow} = a^c_{\uparrow} \end{cases}$$

خاصیت ذره‌ی مایورانا

$$\nu \downarrow \neq \bar{\nu} \uparrow$$

$\pi^- \longrightarrow$



میون هلیستی $+\frac{1}{2}$

$$\begin{bmatrix} \sqrt{p\cdot\sigma}\ \xi \\ \sqrt{p\cdot\bar{\sigma}}\ \xi \end{bmatrix} \qquad \sqrt{p\cdot\sigma}\ \xi = \begin{pmatrix} \sqrt{E-p_z} & \\ & \sqrt{E+p_z} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \end{pmatrix}$$

$$m \neq 0 \Longrightarrow E - p_z \neq 0$$

$$\frac{\Gamma(\pi^- \to e^- + \bar{\nu}_e)}{\Gamma(\pi^- \to \mu^- + \bar{\nu}_\mu)} \approx 1.23 \times 10^{-4}$$

$$\pi^-(q) \to l^-(p)\ \bar{\nu}_l(k) \qquad V = \frac{G}{\sqrt{2}} J_\mu^{\pi^-} J_\mu^{(l)}$$

$$M = \frac{G}{\sqrt{2}} \langle 0 | J_\mu^{\pi^-} | \pi^-(q) \rangle\, \bar{u}_l \gamma^\mu (1-\gamma_5) v_{\bar{\nu}_l}(k)$$

$$\langle 0 | J_\mu^{\pi^-} | \pi^-(q) \rangle = q_\mu f_\pi$$

$$\Gamma(\pi^- \to l^- + \bar{\nu}_l) = \frac{G^2}{8\pi} f_\pi^2\, m_\pi\, m_l^2 \left(1 - \frac{m_l^2}{m_\pi^2}\right)^2$$

$$\frac{\Gamma(\pi^- \to e^- \bar{\nu}_e)}{\Gamma(\pi^- \to \mu^- \bar{\nu}_\mu)} = \left(\frac{m_e}{m_\mu}\right)^2 \left(\frac{m_\pi^2 - m_e^2}{m_\pi^2 - m_\mu^2}\right)^2 = 1.28 \times 10^{-4}$$

$$J_\mu^{\pi^-} = \bar{u}\gamma^\mu \frac{1-\gamma_5}{2} d$$

$$\tau_{\pi^-} = 2.6 \times 10^{-8}\ \text{sec}$$

$$f_\pi \simeq 0.92\, m_{\pi^-}$$

جریان‌های کبیبو

$$J_\mu^{(h)} = \underbrace{\cos\theta_c}_{\text{Cabbibo}}\, \underbrace{J_\mu^{(0)}}_{\Delta S = 0} + \sin\theta_c\, \underbrace{J_\mu^{(1)}}_{\Delta S = 1}$$

Semi leptonic hadronic weak decay

$$\frac{G}{\sqrt{2}} \left(J_\mu^{(h)} J^{(l)\mu} \right)$$

$$\frac{\Gamma(K^- \to \mu^- + \bar\nu_\mu)}{\Gamma(\pi^- \to \mu^- + \bar\nu_\mu)} = \frac{\sin^2\theta_c}{\cos^2\theta_c} \frac{f_K^2}{f_\pi^2} \frac{m_K}{m_\pi} \frac{\left(1 - \frac{m_\mu^2}{m_K^2}\right)}{\left(1 - \frac{m_\mu^2}{m_K^2}\right)}$$

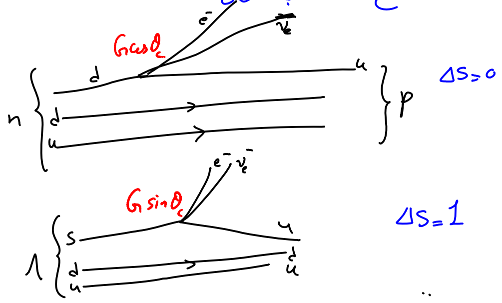
SU(3)
طعم

$$\begin{pmatrix} u \\ d \\ s \end{pmatrix} \to f_\pi \simeq f_K \longrightarrow \sin\theta_c \approx 0.2$$

$$K^- \to \pi^0 + e^- + \bar\nu_e \qquad \xleftarrow{(1975)} \qquad \sin\theta_c = 0.220$$

$$\Lambda \to p + e^- + \bar\nu_e \qquad \xrightarrow{1983} \qquad \sin\theta_c \simeq 0.23$$

در سطح کوارک ها چه اتفاقی می افتد.



spectator   ناظر

$$V_{CKM} = \begin{bmatrix} U_{ud} & U_{us} & U_{ub} \\ U_{cd} & U_{cs} & U_{cb} \\ U_{td} & U_{ts} & U_{tb} \end{bmatrix}$$

$$U = \begin{bmatrix} u \\ c \\ t \end{bmatrix} \qquad D = \begin{bmatrix} d \\ s \\ b \end{bmatrix}$$

ویژه حالت های جرم

$$J^\mu_{(h)} = \sum_{\substack{i \in \{u,c,t\} \\ j \in \{d,s,b\}}} (V_{CKM})_{ij} \, \bar U_i \gamma^\mu \frac{(1-\gamma_5)}{2} D_j$$

$$V_{CKM} = \begin{bmatrix} c_{12}c_{13} & s_{12}c_{13} & s_{13}e^{-i\delta} \\ -s_{12}c_{23} - c_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{12}c_{23} - s_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & s_{23}c_{13} \\ s_{12}s_{23} - c_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & -s_{23}c_{12} - s_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{23}c_{13} \end{bmatrix}$$

پارامتری کردن استاندارد.

فقط یک فاز

$$\cancel{CP} \leftarrow \delta \neq 0$$

یک ماتریس یکانی ۳×۳ چندتا فاز دارد.

یک ماتریس متعامد حقیقی $n \times n$ چندتا پارامتر آزاد دارد.

$$n^2 - n - \frac{n(n-1)}{2} = \frac{n^2 - n}{}$$

$$n=2 \Rightarrow \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix}$$

ماتریس $n\times n$ یکانی

$$2n^2 - n - 2\times\frac{n(n-1)}{2} = n^2$$

$$\underbrace{n^2 - \frac{n^2-n}{2}}_{\text{فاز}} = \frac{n^2+n}{2}$$

$n=3 \rightarrow 5$ فاز

$\psi \rightarrow e^{i\varphi}\psi$ $\qquad$ $\bar{\psi}\gamma\psi \rightarrow$ خودش

$\bar{\psi}\psi \rightarrow$ خودش

$u \rightarrow e^{i\varphi_u} u$

$d \rightarrow e^{i\varphi_d} d$

$\vdots$

$2n-1 \rightarrow$ فاز جذب می‌شه

$$\frac{n^2+n}{2} - (2n-1) = \frac{n^2-3n+2}{2}$$ فاز فیزیکی

$n=3 \rightarrow$ یک فاز

$n=2$ صفر فاز

با دو نسل نقض CP نداریم.

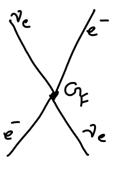
$\theta_{12} \simeq \theta_C$ $\qquad$ زاویه‌ی کبیبو

$G_\beta = G_\mu \cos\theta_c \qquad \cos\theta_c \simeq 0.975$

$$G_\beta\left(\bar{d}\gamma^\mu\frac{1-\gamma_5}{2}u\right)\left(\bar{\nu}_e\gamma_\mu\frac{1-\gamma_5}{2}e\right)$$

$$G_\mu\left(\bar{\mu}\gamma^\mu\frac{1-\gamma_5}{2}\nu_\mu\right)\left(\bar{\nu}_e\gamma_\mu\frac{1-\gamma_5}{2}e\right)$$

مشکلات برهمکنش فرمی



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

$$M = \frac{G_F}{\sqrt{2}}\left[\bar{u}_{\nu_e}(k')\gamma_\mu(1-\gamma_5)u_e\right]\left[\bar{u}_e\gamma^\mu(1-\gamma_5)u_\nu(k)\right]$$

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{\overline{|M|^2}}{64\pi^2 s} = \frac{G_F^2 s}{4\pi^2}$$

Froissart bound

$\sigma < (\ln s)^2$ $\qquad$ دارای

partial wave

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = |f(\theta)|^2 = \left|\frac{1}{2ik}\sum_{l=0}^{+\infty}(2l+1)f_l P_l(\cos\theta)\right|^2$$

شرط یکانی بودن $|f_l| \leq 1$

Perkins فصل ۴

$$\psi_i = \frac{e^{ikz}}{N} = \frac{1}{N}\frac{i}{2kr}\sum_l (2l+1)\left[(-1)^l e^{-kri} + e^{ikr}\right]P_l(\cos\theta)$$

$$\psi_{scatter} = \frac{e^{ikr}}{r}\frac{1}{2ik}\sum_{l=0}^{+\infty}(2l+1)f_l P_l(\cos\theta)$$

یکانی $\int|\psi_i + \psi_{scatter}|^2 r^2\,dr\,d\cos\theta$

$$= \int|\psi_i|^2 r^2\,dr\,d\cos\theta$$

$$\Downarrow$$

$$f_l \leq 1$$

برهمکنش نقطه‌ای $f_0 \neq 0$ $f_l = 0$ $l>0$

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \text{ثابت}$$

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{|f_0|^2}{4E^2} \underbrace{\leq \frac{1}{4E^2}}_{\text{یکانی بودن}}$$

$$E \geq \frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{\frac{\pi}{G_F}} \approx 370\ \text{GeV}$$

مراتب بالای اختلال اوضاع را بدتر می‌کند.

بازبهنجارپذیری

بعد G_F را حساب کنید.

مثال

$$[\mathcal{L}\,d^4x] = 1 \qquad [X] = M^{-1}$$

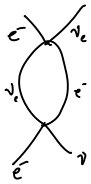
$$[\mathcal{L}] = M^4$$

اسکالر $\partial_\mu\varphi\,\partial^\mu\varphi$ $[\varphi] = M$

میدان برداری $m^2 V_\mu V^\mu$ $[V_\mu] = M$

میدان اسپینوری $\bar\psi\,\partial\!\!\!/\,\psi$ $[\psi] = M^{3/2}$

محاسبات حلقه بی‌نهایت های غیرقابل کنترل می‌دهد.

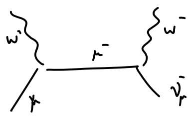


$$\ominus \int^{\Lambda} \frac{d^4k}{(2\pi)^4} \frac{\cancel{k}\,\cancel{k}}{k^2\ k^2} \propto \Lambda^2$$

Intermediate Weak boson

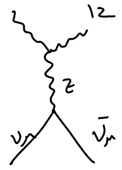
$$\mathcal{M} = -\left[\frac{g}{\sqrt{2}}\, \bar{u}_{\nu_\mu}\, \gamma_\rho\, \frac{1-\gamma_5}{2}\, u_\mu\right] \frac{-g^{\rho\sigma} + \frac{q^\rho q^\sigma}{m_W^2}}{q^2 - m_W^2} \left[\frac{g}{\sqrt{2}}\, \bar{u}_e\, \gamma_\sigma\, \frac{1-\gamma_5}{2}\, u_{\nu_e}\right]$$

$$\frac{G_F}{\sqrt{2}} = \frac{g^2}{8 m_W^2}$$

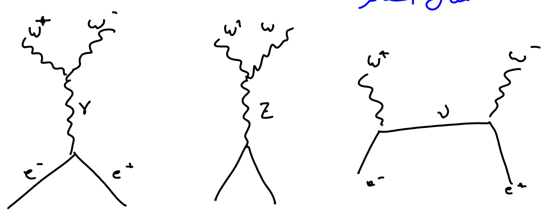


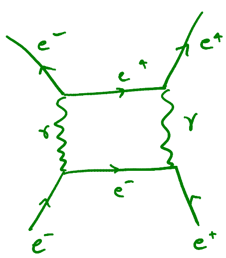
$$\mathcal{M} = \left(\frac{g}{\sqrt{2}}\right)^2 \underbrace{\varepsilon_\mu^* \varepsilon_\nu^*}_{\text{polarization vector}} \bar{v}(p')\, \gamma^\mu \frac{1-\gamma_5}{2} \frac{\not{p} - \not{k} + m_\mu}{(p-k)^2 - m_\mu^2}\, \gamma^\nu \frac{1-\gamma_5}{2}\, u$$

$$\sigma = \frac{G_F^2\, s}{12\pi}$$

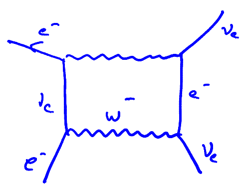


مثال آشنا



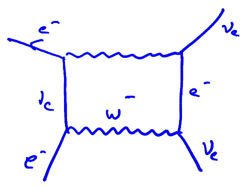


$$\int \frac{\cancel{k}\ \cancel{k}}{(k^2)^4}\, d^4k$$

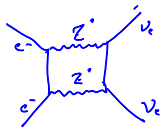


$$\frac{-1}{k^2 - m_W^2}\left(g_{\mu\nu} - \frac{k_\mu k_\nu}{m_W^2}\right)$$

e^- $\qquad\qquad$ e^+



$$\frac{-1}{k^2-m_W^2}\left(g_{\mu\nu}-\frac{k_\mu k_\nu}{m_W^2}\right)$$



Precise B, B_c, B_s meson spectroscopy from full lattice QCD

Peter Lepage $\qquad$ ← مقاله

$\Delta m_B \simeq 10$ MeV

$\varphi_1 \cdots \varphi_n \qquad \psi_1 \ldots \psi_n$

$$M_{ij}\,\varphi_i^\dagger \psi_j$$

چندتا فاز را می‌شه جذب کرد؟

$2n-1$

$$\begin{bmatrix}\varphi_1\\ \varphi_2\\ \vdots\\ \varphi_n\end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} e^{i\alpha_1} & & & \\ & e^{i\alpha_2} & & \\ & & \ddots & \\ & & & e^{i\alpha_n}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\varphi_1\\ \varphi_2\\ \varphi_3\\ \vdots\\ \varphi_n\end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix}\psi_1\\ \vdots\\ \psi_n\end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} e^{i\beta_1} & & & \\ & e^{i\beta_2} & & \\ & & \ddots & \\ & & & e^{i\beta_n}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\psi_1\\ \vdots\\ \psi_n\end{bmatrix}$$

$$\left.\begin{aligned}\alpha_i &\longrightarrow \alpha_i-\theta\\ \beta_i &\longrightarrow \beta_i+\theta\end{aligned}\right\}$$

همان
آش و همان
کاسه!

$2n-1$ $\qquad$ تعداد فازهای مستقل قابل جذب

$\sin\theta_c$ $\qquad$ معمای حدّ

$$j^{(h)} = \cos\theta_c\, \underset{\substack{\downarrow\\ \Delta S=0}}{J_\mu^{(0)}} + \sin\theta_c\, \underset{\substack{\downarrow\\ \Delta S=1}}{J_\mu^{(1)}}$$