

Série de Exercícios 2

Nota: A resolução dos exercícios deverá ser entregue até 15 de Dezembro por e-mail para pimenta@lip.pt. O ficheiro deverá estar em formato pdf e o seu nome deverá ser serie2_XXXXX.pdf (onde XXXXX é o número do aluno). Caso decida entregar um scan duma versão manuscrita deverá usar caneta preta sobre folhas brancas.

I

O tempo de vida do μ^+ é 2.2×10^{-6} s e o *branching ratio* para o decaimento do τ^+ em $e^+\nu\bar{\nu}$ é de cerca de 17%.

- Desenhe o diagrama de Feynman de primeira ordem correspondente ao decaimento do μ^+ .
- Determine o tempo de vida do τ^+ .
- Determine o tempo de vida do μ^- .

II

No quadro do modelo standard (ver vértices relevantes no final do enunciado) considere os processos seguintes:

- $e^-(p_1) + e^+(p_2) \rightarrow \nu_e(p_3) + \bar{\nu}_e(p_4)$
- $e^-(p_1) + e^+(p_2) \rightarrow H(p_3) + \mu^-(p_4) + \mu^+(p_5)$
- $e^-(p_1) + \bar{\nu}_e(p_2) \rightarrow e^-(p_3) + \bar{\nu}_e(p_4)$
- $e^-(p_1) + e^+(p_2) \rightarrow \nu_\mu(p_3) + \bar{\nu}_\mu(p_4) + \gamma(p_5)$

Despreze a massa dos leptões na interação com o bosão de Higgs.

- Desenhe o(s) diagrama(s) de Feynman para todos os processos em ordem mais baixa de teoria de perturbações.
- Escreva a expressão para as amplitudes de todos os diagramas, tendo em conta as regras de Feynman. Explícite claramente a direção da seta na linhas fermiónicas. Utilize os momentos indicados no enunciado. (**Nota:** Não é para calcular nada, só para escrever as expressões das amplitudes).

III

Considere no quadro do modelo standard o processo,

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

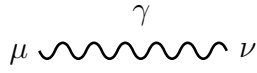
- a) Desenhe o(s) diagrama(s) que contribuem para o processo em ordem mais baixa de teoria de perturbações.
- b) Escreva a(s) expressão para a(s) amplitude(s) sem aproximações.
- c) Considere agora que a energia no CM é muito maior que as massas dos leptões mas não do que a massa do W e Z . Mostre que neste limite ($m_e = m_\mu = m_\nu = 0$) os termos proporcionais ao momento no numerador do propagador se anulam quando se usa a equação de Dirac.
- d) Use o resultado anterior para escrever uma expressão simplificada para a amplitude.
- e) Faça a soma dos spins e use os resultados sobre traços para calcular $\langle |\mathcal{M}|^2 \rangle$ no limite em que se desprezam as massas dos leptões. Veja as expressões relevantes no final do enunciado.
- f) Encontre $d\sigma/d\Omega$ no referencial do CM.
- g) Encontre a secção eficaz total no limite em que $m_\mu, m_e \ll \sqrt{s} \ll M_W$. Comente o resultado.

IV

Os decaimentos $K_L^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ é altamente suprimido ($BR \sim 10^{-8}$) em contradição com o modelo de Cabibbo. Explique este facto e desenhe os diagramas de Feynman relevantes.

Regras de Feynman

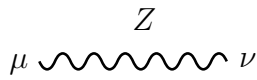
Propagadores



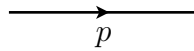
$$-i \frac{g_{\mu\nu}}{k^2}$$



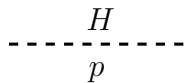
$$-i \frac{g_{\mu\nu} - \frac{k_\mu k_\nu}{M_W^2}}{k^2 - M_W^2}$$



$$-i \frac{g_{\mu\nu} - \frac{k_\mu k_\nu}{M_Z^2}}{k^2 - M_Z^2}$$



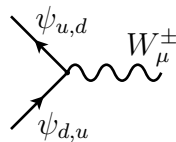
$$\frac{i(\not{p} + m_f)}{p^2 - m_f^2}$$



$$\frac{i}{p^2 - M_H^2}$$

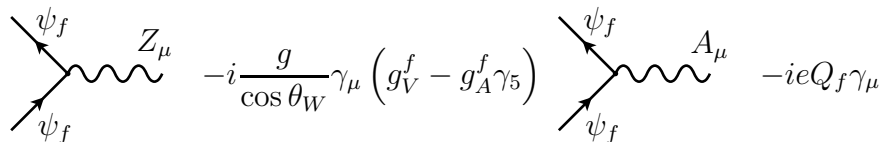
Vértices

Corrente Carregada



$$-i \frac{g}{\sqrt{2}} \gamma_\mu \frac{1 - \gamma_5}{2}$$

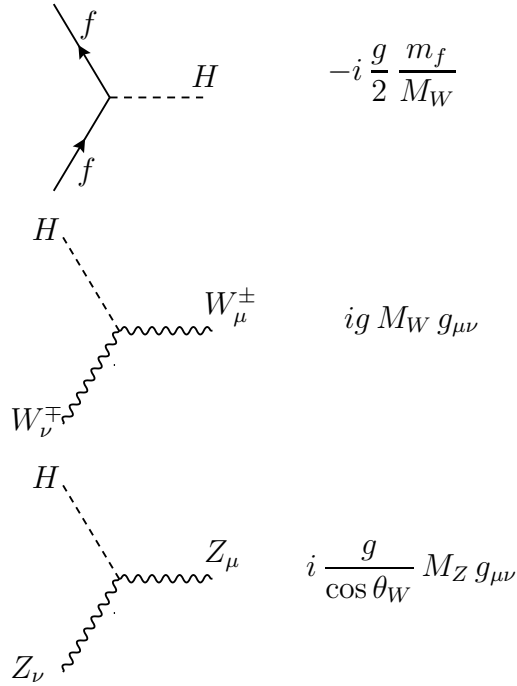
Corrente Neutra



onde

$$g_V^f = \frac{1}{2} T_f^3 - Q_f \sin^2 \theta_W, \quad g_A^f = \frac{1}{2} T_f^3 .$$

Vértices do Higgs



Resultados para cálculo de traços

$$\begin{aligned} \text{Tr}[\gamma^\mu \gamma^\nu] &= 4 g^{\mu\nu}, & \text{Tr}[\not{p}_1 \gamma^\mu \not{p}_2 \gamma^\nu] &= 4 [p_1^\mu p_2^\nu + p_1^\nu p_2^\mu - g^{\mu\nu} (p_1 \cdot p_2)] \\ \text{Tr}[\not{p}_1 \gamma^\mu \not{p}_2 \gamma^\nu \gamma_5] &= -4i \epsilon^{\alpha\mu\beta\nu} p_{1\alpha} p_{2\beta}, & \epsilon^{\alpha\mu\beta\nu} \epsilon_{\rho\mu\sigma\nu} &= -2 (g^\alpha_\rho g^\beta_\sigma - g^\alpha_\sigma g^\beta_\rho) \end{aligned}$$

Soma nas polarizações

$$\sum_{\text{spins}} u(p)_\alpha \bar{u}_\beta(p) = (\not{p} + m)_{\alpha\beta}, \quad \sum_{\text{spins}} v(p)_\alpha \bar{v}_\beta(p) = (\not{p} - m)_{\alpha\beta}$$

$$\sum_{\text{pol}} \epsilon_\mu(k) \epsilon_\nu^*(k) = -g_{\mu\nu}, \quad \text{para o fóton}$$

$$\sum_{\text{pol}} \epsilon_\mu(k) \epsilon_\nu^*(k) = -g_{\mu\nu} + \frac{k_\mu k_\nu}{M_V^2}, \quad V = W, Z$$