



Exame de Teoria do Campo

Curso de Física Tecnológica - 2008/2009
(Entregar até ao dia 30/7/2009 às 18 horas.)

Os problemas situam-se dentro do Modelo Standard (SM) das interacções fracas e electro-magnéticas. Os acoplamentos que não estão no livro de texto são dados no final do enunciado. Os valores das massas e das larguras que precisar pode encontrar no site do *Particle Data Group* em <http://pdg.lbl.gov/>.

I

Este problema destina-se a mostrar a importância do bóson de Higgs para a consistência interna do Modelo Standard. Para isso considere o processo (académico, claro) no referencial CM,

$$W_L^-(p_1) + W_L^+(p_2) \rightarrow W_L^-(q_1) + W_L^+(q_2) \quad (1)$$

onde os momentos estão indicados e o índice L quer dizer que os bosões W^\pm estão polarizados longitudinalmente.

- a) Sabendo que no referencial próprio, onde $p^\mu = (M_W, 0, 0, 0)$, o vector polarização longitudinal se escreve $\varepsilon_L^\mu(p) = (0, 0, 0, 1)$, satisfazendo $\varepsilon_L(p) \cdot \varepsilon_L(p) = -1$ e $\varepsilon_L(p) \cdot p = 0$, mostre que no referencial onde o W se desloca com velocidade $\vec{\beta}$, esse vector se escreve,

$$\varepsilon_L^\mu(p) = (\gamma\beta, \gamma\hat{\beta})$$

onde, como habitualmente, $\vec{\beta} = \vec{p}/E$, $\gamma^{-1} = \sqrt{1 - \beta^2}$ e $\hat{\beta} = \vec{\beta}/\beta$. Verifique que as relações invariantes $\varepsilon_L(p) \cdot \varepsilon_L(p) = -1$ e $\varepsilon_L(p) \cdot p = 0$ se mantêm.

- b) Para processos de duas partículas para duas partículas pode-se mostrar que a unitariedade (conservação de probabilidade) tem como consequência que a amplitude total do processo, no limite de altas energias $s \gg M_W^2$, tem que ser ou constante ou decrescer com a energia. Mostre que isso quer dizer que a secção eficaz decresce com a energia.
- c) Calcule agora as amplitudes para o processo da Eq. (1). Escreva as amplitudes na forma

$$M = M_{\gamma+Z}^s + M_{\gamma+Z}^t + M_{4W} + M_H^{s+t} \quad (2)$$

onde, numa notação óbvia, $M_{\gamma+Z}^s$ é a soma dos diagramas do canal s para o γ e Z^0 e assim sucessivamente.

- d) Considere agora o limite de altas energias. Para isso defina uma variável adimensional $x = s/(4M_W^2)$ e mostre que as várias amplitudes se podem escrever na forma ($x \gg 1$)

$$M_i = A_i x^2 + B_i x + C_i + \mathcal{O}(1/x)$$

- e) De acordo com resultado da alínea b) devemos ter

$$\sum_i A_i = 0, \quad \sum_i B_i = 0$$

onde a soma é sobre todos os diagramas. Mostre que isto acontece e que para $\sum_i A_i = 0$ a razão tem origem somente nos acoplamentos de gauge, mas que para $\sum_i B_i = 0$ os diagramas do bóson de Higgs, com os acoplamentos ditados pelo mecanismo de Higgs, são fundamentais. Conclui-se assim que o bóson de Higgs é crucial para a consistência do Modelo Standard.

Ajuda: Para verificarem que estão no bom caminho deixo aqui dois valores intermédios:

$$A_{\gamma+Z}^s = -4g^2 \cos \theta, \quad B_{\gamma+Z}^t = g^2 \left(-\frac{3}{2} + \frac{15}{2} \cos \theta \right)$$

onde θ é o ângulo de difusão no CM entre o momento \vec{q}_1 e o momento incidente \vec{p}_1 .

II

Considere o principal processo de produção do bóson de Higgs num colisionador linear (neste momento em fase de projecto),

$$e^- e^+ \rightarrow ZH$$

- a) Calcule a secção eficaz no referencial do centro de massa em função das massas dos bosões Z e H e da energia do centro de massa \sqrt{s} . Desprezar as massas dos electrões. Pode usar o método que quiser (traços ou amplitudes de helicidade).
- b) Faça um gráfico da secção eficaz para $\sqrt{s} \in [M_H + M_Z, 1000]$ GeV e para três valores da massa do bóson de Higgs, $M_H = 110, 120, 140$ GeV.
- c) Este processo está muito bem estudado na literatura. Faça uma busca bibliográfica para encontrar um exemplo e para um ponto particular (\sqrt{s}, m_H) reproduza o resultado. Entregue uma cópia do gráfico da referência que encontrar.
- d) Considere agora que o bóson Z^0 está polarizado longitudinalmente (ver problema anterior). Calcule a secção eficaz neste caso, designada por secção eficaz longitudinal σ_L . Faça um gráfico, para $M_H = 120$ GeV e para $\sqrt{s} \in [M_H + M_Z, 1000]$ GeV, da razão

$$R = \frac{\sigma_L}{\sigma_L + \sigma_T}$$

Discuta o resultado no caso em que $\sqrt{s} \gg M_Z, M_H$. Notar que não precisa de calcular a secção eficaz para polarização transversal, σ_T , pois $\sigma_{\text{Total}} = \sigma_L + \sigma_T$ e σ_{Total} foi o que calculou na alínea a).

NOTAS

• Vértices

$$-i \frac{g}{2} \frac{m_f}{m_W}$$

$$ig m_W g_{\mu\nu}$$

$$i \frac{g}{\cos \theta_W} m_Z g_{\mu\nu}$$

$$-ie [g_{\alpha\beta}(p-k)_\mu + g_{\beta\mu}(k-q)_\alpha + g_{\mu\alpha}(q-p)_\beta]$$

$$ig \cos \theta_W [g_{\alpha\beta}(p-k)_\mu + g_{\beta\mu}(k-q)_\alpha + g_{\mu\alpha}(q-p)_\beta]$$

$$ig^2 [2g_{\alpha\nu}g_{\beta\mu} - g_{\alpha\mu}g_{\beta\nu} - g_{\alpha\beta}g_{\mu\nu}]$$

- No problema I deverá utilizar as relações, válidas no Modelo Standard:

$$e = g \sin \theta_W, \quad M_W = M_Z \cos \theta_W$$