PRODUÇÃO DE DIMÚONS EM COLISORES ELÉTRON-PÓSITRON

Gabriel Rodrigues da Luz, Isabella Papa Tahedl, Bruno Duarte da Silva Moreira

INTRODUÇÃO

A produção de pares de múons via aniquilação elétron-pósitron constitui um dos processos fundamentais da Eletrodinâmica Quântica (*Quantum Electrodynamics* – QED). Em colisores de partículas, a análise detalhada da produção de dimúons pode fornecer informações valiosas a respeito das interações fundamentais, propiciando o teste de teorias do Modelo Padrão da Física de Partículas e a busca por nova física. O objetivo deste trabalho é desenvolver e consolidar habilidades relacionadas à manipulação de formalismos matemáticos empregados em Física de Partículas, bem como à implementação computacional de cálculos de amplitudes e observáveis físicos. Dessa forma, foi realizada uma derivação analítica e computacional da amplitude de espalhamento do processo e da seção de choque diferencial do processo $e^+ e^- \rightarrow \mu^+ \mu$ empregando o método das amplitudes de helicidade. Além de ser um método eficiente para o estudo de altas energias, o método das amplitudes de helicidade é mais intuitivo do que métodos tradicionais para soma de polarizações de spin como o cálculo dos traços de matrizes gamma de Dirac.

DESENVOLVIMENTO

A metodologia adotada fundamenta-se na aplicação das Regras de Feynman para partículas de spin ½ (Halzen; Martin, 1984), a qual permite escrever as amplitudes de espalhamento, ingredientes importantes que trata da interação presente no processo, em termos dos espinores de partícula livre na base de helicidade. Inicialmente, revisou-se a equação de Dirac livre para compreender a origem dos espinores de partícula u e de antipartícula v. Utilizando espinores na base de helicidade presentes na literatura, usamos as Regras de Feynman da QED referente ao diagrama da Figura 1, para construir a amplitude de transição representando a aniquilação elétron-pósitron em um fóton virtual e a posterior criação de um par de múons (múon e antimúon). Para contornar a elevada complexidade algébrica do método tradicional de traços de matrizes gamma de Dirac, aplicou-se o método das amplitudes de helicidade (Thomson, 2013). Esta técnica consiste em escrever os elementos de matriz como produtos escalares de correntes leptônicas conservadas associadas aos estados de projeção de spin dos léptons iniciais e finais. Esta etapa corresponde à soma das polarizações de spin, tendo em vista que, em geral, estas não são medidas nos colisores e, portanto, a soma no cálculo teórico é fundamental para a comparação com dados experimentais. Os cálculos cinemáticos foram feitos no referencial de centro de massa (CM) no limite ultra-relativístico, onde as massas das partículas podem ser ignoradas. Para o auxílio dos cálculos dos produtos escalares entre a corrente eletrônica e muônica, usamos o software livre wxMaxima, que permite cálculo simbólico de expressões. Além disso, de posse do módulo quadrado da amplitude de espalhamento somada sobre spins, podemos calcular a seção de choque e comparar com dados experimentais. Para isso, implementamos a equação da seção de choque em um programa na linguagem FORTRAN, no qual nos possibilitou gerar o gráfico da Figura 2 utilizando o software xmGrace. Neste trabalho, comparamos nossos resultados com os dados da colaboração JADE (BARTEL et al., 1985) do colisor PETRA (“Positron-Electron Tandem Ring Accelerator” - acelerador anular para pósitrons e elétrons).

RESULTADOS

Ao utilizar o método desenvolvido na seção anterior, foi possível obter expressões analíticas para as amplitudes de espalhamento considerando as diferentes projeções de spin. De forma geral, podemos escrever

$$\mathcal{M} = -\frac{e^2}{s} g_{\mu\nu} \left[\bar{v}(p_2)\gamma^{\mu} u(p_1)\right] \left[\bar{u}(p_3)\gamma^{\nu} v(p_4)\right], \quad (1)$$

em que *e* é a carga elementar, $g_{\mu\nu}$ é o tensor métrico, γ^{μ} são as matrizes gamma de Dirac, *u* e *v* são os espinores de Dirac de partícula e antipartícula, enquanto suas versões com barra são os espinores adjuntos (por exemplo $\overline{u} = u^{\dagger}\gamma^{0}$). Usando os espinores na base de helicidade (Thomson, 2013), é possível mostrar que, as combinações de spin não nulas para as amplitudes serão

$$\begin{aligned} \mathcal{M}(\uparrow\downarrow\rightarrow\uparrow\downarrow) &= \mathcal{M}(\downarrow\uparrow\rightarrow\downarrow\uparrow) = 4\pi\alpha(1+\cos\theta) \\ \mathcal{M}(\uparrow\downarrow\rightarrow\downarrow\uparrow) &= \mathcal{M}(\downarrow\uparrow\rightarrow\uparrow\downarrow) = 4\pi\alpha(1-\cos\theta), \end{aligned} \quad (2)$$

com $\uparrow$ sendo a projeção de spin na direção do movimento (partículas de mão direita) e $\downarrow$ a projeção de spin na direção oposta ao movimento (partículas de mão esquerda).

De posse desses resultados, podemos escrever a seção de choque diferencial no referencial do CM. Seguindo Halzen e Martin (1984), a seção de choque diferencial em ângulo sólido é dada por

$$\left.\frac{d\sigma}{d\Omega}\right|_{\mathrm{CM}} = \frac{\langle|\mathcal{M}|^2\rangle}{64\pi^2 s}, \quad (3)$$

sendo $d\sigma/d\Omega$ a seção de choque diferencial em ângulo sólido, $\langle|\mathcal{M}|^2\rangle$ representa o quadrado da amplitude de espalhamento somada sobre os spins e s é o quadrado da energia de centro de massa. Usando a amplitude desenvolvida com o método das amplitudes de helicidade, obtemos para a seção de choque diferencial

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{\alpha^2}{4s}\left(1+\cos^2\theta\right), \quad (4)$$

onde θ é o ângulo de produção dos múons e α é a constante de acoplamento eletromagnética (igual a 1/137). A integração angular da equação (4) fornece

$$\sigma(s) = \frac{4\pi\alpha^2}{3s}. \quad (5)$$

Este resultado pode ser comparado com dados experimentais da colaboração JADE do colisor elétron-pósitron PETRA, conforme mostra a Figura 2. Conforme pode-se observar, a seção de choque possui uma excelente concordância com os dados experimentais, validando os cálculos feitos em QED através do método das amplitudes de helicidade.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O emprego das Regras de Feynman da QED em conjunto com o formalismo das amplitudes de helicidade mostra-se vantajoso e didático. A metodologia eliminou a necessidade de cálculos tensoriais complexos, inerentes aos traços de matrizes gamma de Dirac, fornecendo interpretação física intuitiva sobre a helicidade das partículas em altas energias. Os resultados obtidos foram

confrontados com dados experimentais do colisor PETRA, validando assim a metodologia utilizada. Este estudo envolve uma série de temas fundamentais em fenomenologia de física de partículas, contribuindo para a formação do estudante e preparando-o para estudos mais avançados.

Palavras-chave: aniquilação elétron-pósitron, amplitudes de helicidade, seções de choque e Regras de Feynman.

ANEXOS

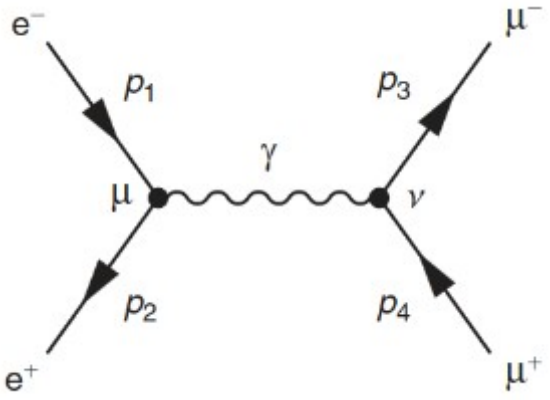


Figura 1. *Diagrama de Feynman para a aniquilação elétron – pósitron em pares de múons. Figura retirada de Thomson (2013).*

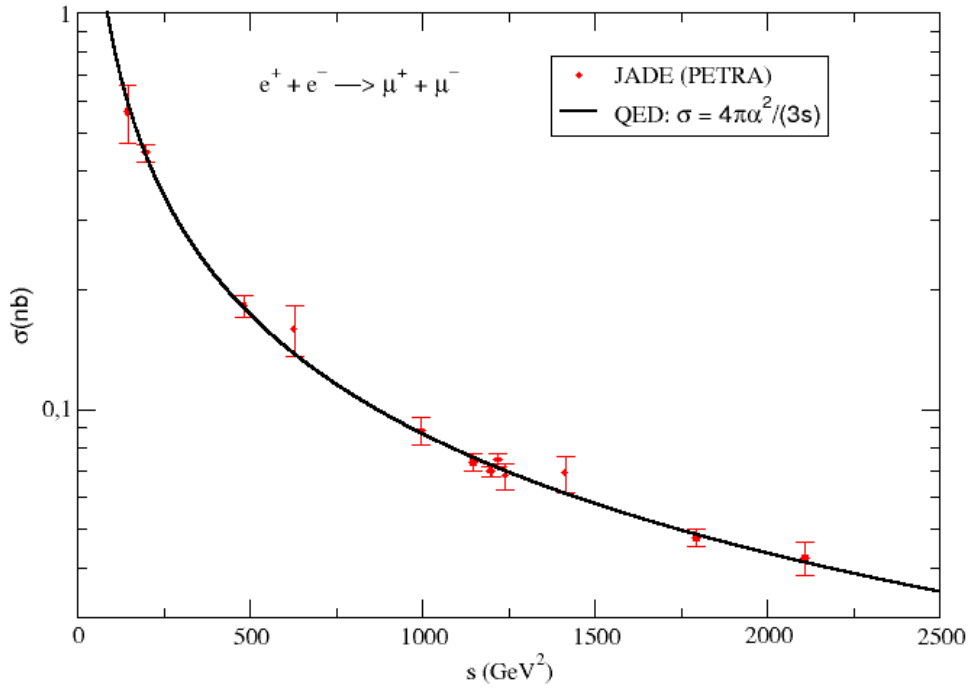


Figura 2. *Seção de choque de aniquilação elétron – pósitron em pares de múons.*

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

THOMSON, M. **MODERN PARTICLE PHYSICS**. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.

HALZEN, F.; MARTIN, A. D. **Quarks and Leptons: An Introductory Course in Modern Particle Physics**. New York: John Wiley & Sons, 1984.

BARTEL, W. et al. (JADE Collaboration). New results on $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$ from the JADE detector at PETRA. **Zeitschrift für Physik C Particles and Fields**, v. 26, n. 4, p. 507–513, 1985.