ELETRODINÂMICA QUÂNTICA DE PARTÍCULAS SEM SPIN

Isabella Papa Tahedl, Roberta de Figueredo, Gabriel Rodrigues da Luz e Bruno Duarte da Silva Moreira

INTRODUÇÃO

A Eletrodinâmica Quântica Escalar (*scalar Quantum Electrodynamics* – sQED) descreve a interação eletromagnética de partículas de spin zero, como mésons pi ($\pi^{\pm}$) ou bósons escalares, sendo os campos governados pela Equação de Klein-Gordon (Halzen; Martin, 1984). Em um contexto pedagógico, a sQED pode ser usada como um modelo simplificado para processos eletromagnéticos. Tratar o processo $e^+ e^- \to \mu^+ \mu^-$ sob a aproximação de partículas escalares permite que o estudante desenvolva intuição física sobre Regras de Feynman para cálculo de amplitudes de espalhamento, conservação de correntes e invariantes cinemáticos, sem a barreira algébrica das matrizes gamma de Dirac, necessária para considerar a soma de polarizações de spin das partículas envolvidas no processo. O objetivo deste trabalho é conciliar o aprendizado teórico e o domínio das ferramentas computacionais e analíticas necessárias à área com a realização da construção analítica e computacional da seção de choque do processo $e^+ e^- \to \mu^+ \mu^-$ no âmbito da sQED, consolidando o aprendizado operacional em fenomenologia de partículas em altas energias. Os resultados serão comparados com a QED padrão e com dados experimentais da colaboração JADE do colisor PETRA ("*Positron-Electron Tandem Ring Accelerator*" - em tradução livre, *acelerador anular para pósitrons e elétrons*).

DESENVOLVIMENTO

A metodologia fundamenta-se na aplicação das Regras de Feynman para campos escalares (para partículas sem spin) interagindo com campos eletromagnéticos. Para a sQED, a amplitude de espalhamento escrita por Regras de Feynman é trivial em comparação à QED padrão, por depender diretamente dos quadrimomenta das partículas envolvidas, em vez da dependência dos espinores de Dirac, que possuem uma complexidade muito maior. Os cálculos cinemáticos foram feitos no referencial de centro de massa (CM) no limite ultra-relativístico, onde todas as massas podem ser desprezadas comparadas às altas energias envolvidas e a soma dos momenta são nulas em cada etapa da colisão. O tratamento algébrico das contrações de momentos quadrivetoriais foram implementados analiticamente.

RESULTADOS

De acordo com Halzen e Martin (1984), as regras de Feynman para o diagrama da Figura 1 (Thomson, 2013) permitem escrever a seguinte amplitude de espalhamento, em termos dos quadrimomenta das partículas envolvidas na colisão

$$-i\mathcal{M} = [-ie(p_1 - p_2)_\mu] \left[\frac{-ig^{\mu\nu}}{(p_1 + p_2)^2}\right] [-ie(p_3 - p_4)_\nu], \quad (1)$$

a qual pode ser reescrita como

$$\mathcal{M} = \frac{e^2}{s}(p_1 - p_2) \cdot (p_3 - p_4), \quad (2)$$

onde s é o quadrado da energia de centro de massa da colisão e é definido por $s = (p_1 + p_2)^2$.

Desenvolvendo da amplitude de espalhamento para o processo $e^+ e^- \rightarrow \mu^+ \mu^-$, foi possível o cálculo analítico da seção de choque diferencial, que é uma das quantidades de interesse em fenomenologia de partículas, pois está associada à probabilidade de ocorrência do processo. Esta seção de choque, no referencial de centro de massa, é dada por (Griffiths, 2008)

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{|\mathcal{M}|^2}{64\pi s}. \quad (3)$$

Nesta equação, dσ/dΩ é a seção de choque diferencial do processo; o termo $|\mathcal{M}|^2$, é o quadrado da amplitude de espalhamento, que contém a dinâmica de interação das partículas. Usando a amplitude obtida em nossos cálculos, é possível mostrar que a seção de choque diferencial é dada por

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

em que θ é o ângulo o qual os múons são produzidos em relação à direção inicial (no referencial de centro de massa) e α é a constante de acoplamento eletromagnético.

A equação (4) acima pode ser integrada, fornecendo a seção de choque total dada por

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

Na Figura 2, apresentamos o gráfico desta seção de choque em função de s, comparado com o resultado completo da QED, levando em conta o spin das partículas ($\sigma = 4\pi\alpha^2/3/s$). Pode-se observar que, apesar de capturar a dependência energética, o método não é completo por não levar em conta o spin das partículas. Entretanto, esta simplificação, permite um aprofundamento em diversos fatores do estudo da física de partículas em altas energias, como a aplicação de regras de Feynman para o cálculo de amplitudes de espalhamento e o cálculo de seções de choque.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O uso da Eletrodinâmica Quântica Escalar como forma de estudar o processo $e^+ e^- \rightarrow \mu^+ \mu^-$, embora não seja capaz de descrever a natureza devido estarmos desprezando o spin das partículas, é uma estratégia didática extremamente interessante, por preparar os estudantes para cálculos mais avançados, uma vez que se utiliza de ferramentas importantes em física de partículas, como o cálculo de amplitudes de espalhamento via aplicação das Regras de Feynman e o cálculo de seções de choque. A comparação entre o comportamento escalar e fermiônico (de spin ½) mostra a importância do spin nestes processos.

Palavras-chave: colisores de partículas, Eletrodinâmica Quântica Escalar, seções de choque e Regras de Feynman.

ANEXOS

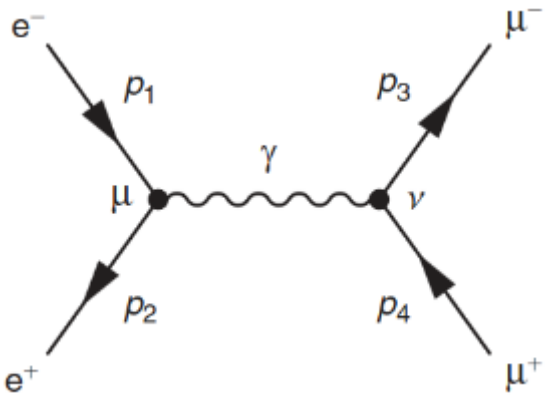


Figura 1. *Diagrama de Feynman para a aniquilação elétron-pósitron e pares de múons. Figura retirada de Thomson (2013).*

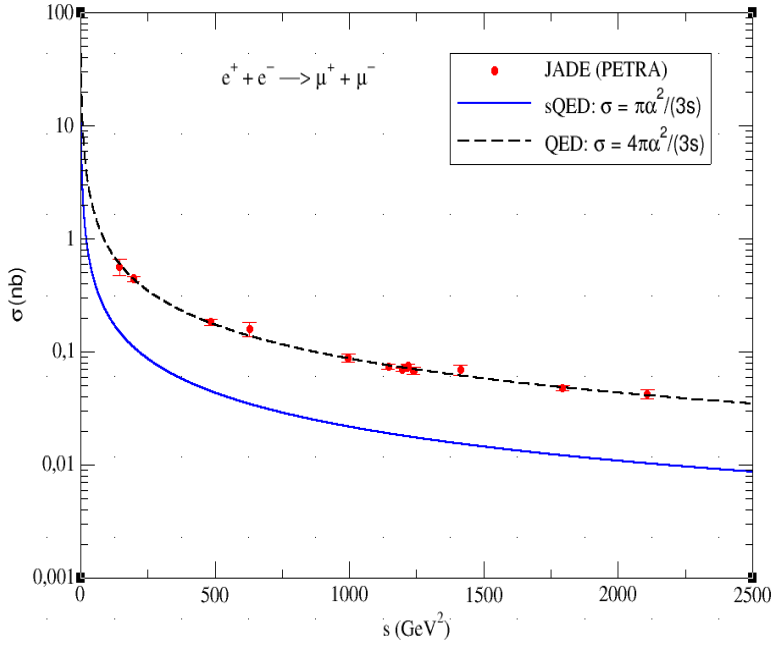


Figura 2. *Comportamento energético da seção de choque de produção de pares de múons em interações elétron-pósitron.*

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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 $e^+e^- \rightarrow m^+m^-$ from the JADE detector at PETRA. **Zeitschrift für Physik C Particles and Fields**, v. 26, n. 4, p. 507–513, 1985.

GRIFFITHS, D. **Introduction to Elementary Particles. 2. ed.** Weinheim: Wiley-VCH, 2008.

THOMSON, Mark. **Modern Particle Physics**. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.