

Método dos Fótons Equivalentes

Revisão e Aplicações

Alfredo Achterberg S. Pacheco

Orientado por: Prof. Dr. Werner Krambeck Sauter

Instituto de Física e Matemática - Universidade Federal de Pelotas

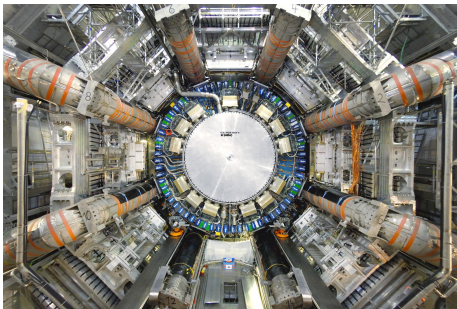
25 de Setembro, 2023



Estrutura da Apresentação

- 1 Introdução e Contextualização
- 2 Objetivos do Trabalho
- 3 Seção de Choque Diferencial e Total
- 4 Demonstração do Método para Partícula Incidente Pontual

Introdução e Contextualização



Colisões de partículas constituem o método experimental mais utilizado atualmente para o entendimento da estrutura fundamental da matéria e de teste para novos modelos físicos.

Figura: Foto do detector ATLAS do LHC. Créditos: [<https://home.web.cern.ch/science/experiments/atlas>]

Estudos desse tipo de processo tem longa história na física.

- ▶ Como exemplo o trabalho de decréscimo de velocidade de partículas α e β em meios materiais por N. Bohr;
- ▶ nesse trabalho, o físico propôs que a interação de partículas carregadas pode ser entendida pelo fenômeno eletromagnético de dispersão (uma analogia);
- ▶ em 1924, E. Fermi propôs que os campos de uma partícula carregada podem ser aproximados como pulsos de onda ou *fluxos de fótons virtuais*.

Introdução e Contextualização

Disso, E. J. Williams, em 1933, propôs a generalização relativística do que seria o método dos fótons equivalentes.

- ▶ O método consiste, de forma introdutória, em obter o número de fótons virtuais do campo eletromagnético de uma partícula a partir da transformada de Fourier dos mesmos campos;
- ▶ este consiste de uma aproximação *semi-clássica* para o cálculo desses fótons virtuais.

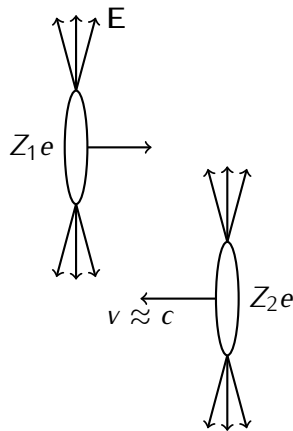


Figura: Esquema representando os campos relativísticos de dois íons Z_1 e Z_2 .

Desde tais desenvolvimentos, este método aproximativo teve maior aplicação e desenvolvimentos na área de interação nuclear e de partículas fundamentais.

- ▶ Em especial, focaremos nas colisões ultraperiféricas de íons;
- ▶ são colisões com maior distância (parâmetro de impacto) e com interação predominantemente eletromagnética;
- ▶ pela interação ser eletromagnética também há menos multiplicidade nos estados finais e os resultados experimentais são mais facilmente tratados;
- ▶ fenômenos de interesse nesses processos incluem a produção de pares de partículas a partir de colisões de fótons.

Objetivos do Trabalho

Para a realização do trabalho propomos uma revisão bibliográfica com cálculo analítico e computacional de quantidades de interesse dos processos de colisão. Para isso, temos os seguintes objetivos específicos:

- 1 realizar a revisão bibliográfica do método;
- 2 realizar o cálculo do fator de forma para o fator de forma para diferentes distribuições de carga;
- 3 deduzir o número de fótons equivalentes para diferentes distribuições de carga;
- 4 realizar um estudo mais aprofundado sobre o fenômeno de fotoprodução de pares de partícula-antipartícula;
- 5 obter as curvas teóricas para as seções de choque de diferentes processos de colisão e compará-las com as curvas experimentais.

Seção de Choque Diferencial e Total

O problema de interesse do método é o de colisão de partículas carregadas. A quantidade de interesse em colisões é a seção de choque.



Figura: Partícula adentrando a região de espalhamento por uma seção de área $d\sigma$ e sendo espalhada em um ângulo sólido $d\Omega$.

Seção de Choque Diferencial e Total

Da figura temos as diferenciais,

$$d\sigma = |b db d\phi|, \quad (1)$$

$$d\Omega = |\sin \theta d\theta d\phi|. \quad (2)$$

A seção de choque total vem pela integral sobre Ω ,

A razão entre as duas é,

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \left| \frac{b}{\sin \theta} \frac{db}{d\theta} \right|. \quad (3)$$

$$\sigma = \int \frac{d\sigma}{d\Omega} \sin \theta d\theta d\phi. \quad (4)$$

Que é a seção de choque diferencial.

Isto para uma partícula incidente individual!

Estamos levando em conta uma partícula individual. Se quisermos tratar um feixe de partículas, vamos precisar definir a *luminosidade*.

Luminosidade

Para um feixe de N partículas com mesma energia atravessando a área $d\sigma$, a luminosidade \mathcal{L} é definida como a quantidade de partículas que atravessam a região de espalhamento por unidade de área por unidade de tempo.

Disso, reescrevemos a seção de choque para um feixe de múltiplas partículas,

$$dN = \mathcal{L} d\sigma, \quad (5)$$

$$\Rightarrow \frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{1}{\mathcal{L}} \frac{dN}{d\Omega}. \quad (6)$$

Demonstração do Método para Carga Pontual

A dedução do método segue os seguintes passos:

- ▶ obter os campos de uma carga pontual em movimento pela transformada de Lorentz;
- ▶ calcular a transformada de Fourier para a frequência dos campos, obtendo assim o espectro de frequência;
- ▶ a quantização do espectro de frequência nos fornece o número de fótons equivalentes dos campos da partícula.

Demonstração do Método para Carga Pontual

Inicialmente consideramos uma carga em movimento como abaixo.¹

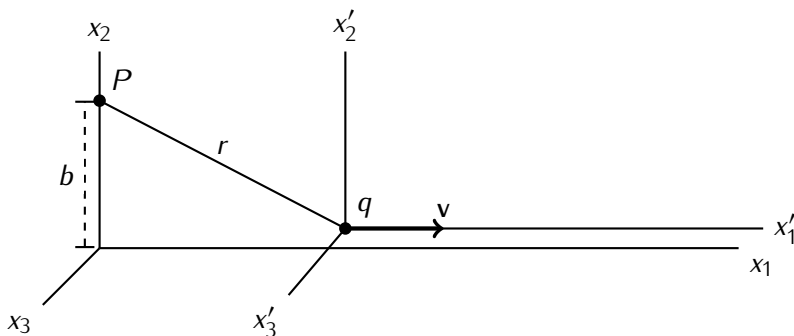


Figura: Carga q em movimento com velocidade v passando por um ponto de observação P com parâmetro de impacto b e distância r .

¹A partir daqui usaremos unidades naturais ($\hbar = c = 1$).

Demonstração do Método para Carga Pontual

Sendo os campos elétrico e magnético escritos em termos dos potenciais,

$$\mathbf{E} = -\nabla\Phi - \frac{\partial\mathbf{A}}{\partial t}, \quad (7)$$

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}, \quad (8)$$

estes são escritos em forma explicitamente covariante usando o tensor eletromagnético,

$$(F^{\mu\nu}) = \begin{pmatrix} 0 & -E_1 & -E_2 & -E_3 \\ E_1 & 0 & -B_3 & B_2 \\ E_2 & B_3 & 0 & -B_1 \\ E_3 & -B_2 & B_1 & 0 \end{pmatrix}. \quad (9)$$

Demonstração do Método para Carga Pontual

Este se transforma como,

$$F'^{\mu\nu} = \Lambda_{\alpha}^{\mu} \Lambda_{\beta}^{\nu} F^{\alpha\beta} \quad (10)$$

onde Λ_{μ}^{ν} são os componentes da matriz de transformação de Lorentz,

$$(\Lambda_{\nu}^{\mu}) = \begin{pmatrix} \gamma & -\gamma\beta & 0 & 0 \\ -\gamma\beta & \gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (11)$$

sendo $\gamma = (1 - \beta^2)^{-1/2}$ e $\beta = v/c$ os parâmetros relativísticos da partícula.

Demonstração do Método para Carga Pontual

A transformação dos campos é assim obtida como,

$$\begin{cases} E'_1 = E_1 \\ E'_2 = \gamma(E_2 - \beta B_3) \\ E'_3 = \gamma(E_3 + \beta B_2) \end{cases} \quad \begin{cases} B'_1 = B_1 \\ B'_2 = \gamma(B_2 + \beta E_3) \\ B'_3 = \gamma(B_3 - \beta E_2) \end{cases} . \quad (12)$$