

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS**

**Instituto de Física e Matemática**

**Curso de Bacharelado em Física**



**Trabalho de Conclusão de Curso**

**Método dos Fótons Equivalentes**

**Alfredo Achterberg Sanchotene Pacheco**

**Pelotas, 2024**



**Alfredo Achterberg Sanchotene Pacheco**

**Método dos Fótons Equivalentes**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto de Física e Matemática da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Física.

Orientador: Werner Krambeck Sauter

Pelotas, 2024



Alfredo Achterberg Sanchotene Pacheco

Método dos Fótons Equivalentes

Trabalho de Conclusão de Curso aprovado, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Física, Instituto de Física e Matemática, Universidade Federal de Pelotas.

Data da defesa: 2 de janeiro de 2024

Banca Examinadora:

---

??? membro 1 ???  
Doutor em ??? – Universidade ???

---

??? membro 2 ???  
Doutor em ??? – Universidade ???

---

??? membro 3 ???  
Doutor em ??? – Universidade ???



## LISTA DE FIGURAS

- Figura 2.1 – Esquemas demonstrando colisão elástica  $a + b \rightarrow a' + b'$ , e inelástica  $a + b \rightarrow a' + c + d$ . . . . . 11
- Figura 2.2 – Área diferencial  $d\sigma$  indicada com centro de espalhamento estático com parâmetro de impacto  $b$ . A partícula é espalhada em um elemento diferencial de ângulo sólido  $d\Omega$ . . . . . 12





## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO . . . . .	9
2	FENÔMENOS DE COLISÃO DE PARTÍCULAS . . . . .	11
2.1	Regra de Ouro de Fermi . . . . .	12
	REFERÊNCIAS . . . . .	13
	APÊNDICES . . . . .	15
	ANEXOS . . . . .	17



## 1 INTRODUÇÃO

Uma das questões que desperta mais interesse na Física é compreender a composição da matéria em sua forma mais fundamental. Almeja-se a obtenção do conhecimento das características básicas dos componentes do mundo em que vivemos, as ditas partículas fundamentais e a forma como esses componentes interagem para criar a matéria da qual o universo é composto. Para tanto, o método de investigação experimental mais utilizado tanto no passado quanto atualmente é o de colisão de partículas (GRIFFITHS, 1987). Este consiste em analisar características das partículas fundamentais e dos núcleos atômicos a partir da forma como estes são espalhados (desviados) quando lançados uns contra os outros (THOMSON, 2013). Características que são obtidas por meio desse método incluem a carga elétrica desses íons e a distribuição de carga para partículas extensas, como os núcleos atômicos. Além disso, é possível investigar as próprias forças fundamentais da natureza nessas colisões e reações (GRIFFITHS, 1987).

Em especial, consideramos o estudo, realizado por Niels Bohr da interação de partículas aceleradas com a matéria (BOHR, 1913). O fenômeno tratado foi do decréscimo de velocidade de partículas  $\alpha$  e  $\beta$  em meios materiais, para o qual o autor elaborou que os elétrons dos átomos oscilariam quando perturbados por forças externas. Nisso, Bohr propôs uma analogia entre o fenômeno eletromagnético de dispersão e o da interação das partículas carregadas.

Posteriormente, se propôs que os campos de uma partícula carregada podem ser aproximados como pulsos de onda e, desta forma, como um fluxo de fótons virtuais (FERMI, 1924). Fermi os usou para tratar dos fenômenos de colisões de partículas carregadas com núcleos atômicos e para o cálculo da seção de choque destas colisões. Uma década após a publicação deste trabalho, foi proposto uma generalização para partículas relativísticas (WILLIAMS, 1933). Este método, denominado de método dos fótons equivalentes, ainda é utilizado e desenvolvido, com a generalização na teoria de eletrodinâmica quântica, para estudos com colisões envolvendo partículas carregadas (BALTZ *et al.*, 2008).

Desde esses trabalhos, o avanço nas áreas de interação nuclear tem aumentado consideravelmente, uma vez que colisões com interação eletromagnética permanecem como uma das formas mais convenientes de estudar a estrutura dos núcleos e núcleons atômicos (HARLAND-LANG, 2023). Em especial, salientamos as colisões ultraperiféricas de íons, que trazem consigo formas de estudar a distribuição de carga e glúons dessas partículas (BERTULANI; KLEIN; NYSTRAND, 2005). Esse método permite um estudo de fenômenos interessantes na física de partículas, como a produção de matéria a partir de radiação eletromagnética, o fenômeno de fotoprodução de partículas. Nesse processo os fótons colidem gerando estados finais com massa e carga, em geral, constituídos de pares de partícula e antipartícula, como elétrons e pósitrons (BAUR; HENCKEN; TRAUTMANN, 1998).

Com isso posto, essas colisões são observadas em experimentos de colisão de última geração, como os disponíveis no LHC<sup>1</sup> (BALTZ *et al.*, 2008). Nestes experimentos, as colisões ultraperi-

---

<sup>1</sup> LHC - *Large Hadron Collider* ou Grande Colisor de Hádrons é um laboratório de colisão de partículas inaugurado em 2008 sob gerenciamento da Organização Europeia de Pesquisas Nucleares.

féricas permitem a obtenção de dados mais limpos (menos partículas sendo produzidas por colisão e menos ruído detectado nos sensores) do que as colisões que envolvem interação de força forte, uma vez que a multiplicidade dos estados finais é menor. Assim, a obtenção das curvas de seção de choque experimentais e sua comparação com a teoria é mais facilmente realizada.

A partir do que foi exposto aqui, este trabalho propõe uma revisão bibliográfica do método dos fótons equivalentes, com análise analítica e computacional dos processos que podem ser estudados a partir do método. Com isso, pretendemos, não somente realizar um estudo analítico dos campos de uma carga pontual se movendo, mas também, realizar o cálculo do número de fótons equivalentes para as diferentes distribuições de carga nuclear propostas na literatura. Realizar a revisão desses cálculos quando disponíveis e propor métodos computacionais para o cálculo destes, quando não forem analiticamente solúveis. Assim, planejamos também obter as seções de choque para alguns íons que são utilizados em experimentos de colisões e comparar com os dados experimentais dos experimentos respectivos.

## 2 FENÔMENOS DE COLISÃO DE PARTÍCULAS

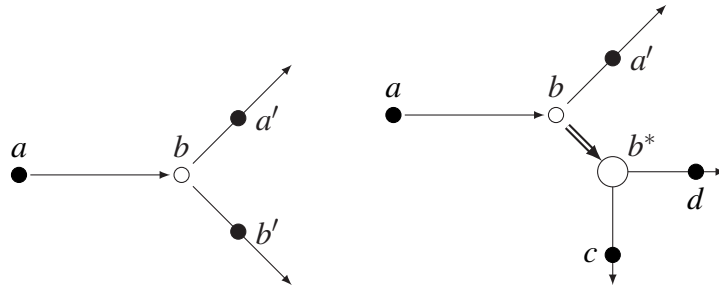
Nesse capítulo, pretendemos fazer uma introdução aos processos de colisão de partículas e de espalhamento. Colisões de partículas consistem de um dos métodos experimentais mais utilizados para o estudo das características da matéria e de seus componentes. Por isso, a motivação para a melhor compreensão desses processos é evidente.

De forma geral, os experimentos de espalhamento constituem de um bombardeamento de um alvo por um feixe de partículas com energia bem definida. Alvos podem ser sólidos, líquidos, gases ou outros feixes de partículas. Disso, espalhamentos observados nesses experimentos são classificados em *elásticos* e *inelásticos* a depender da excitação ou não das partículas alvo (POVH *et al.*, 2012). De forma resumida, no espalhamento elástico as partículas permanecem as mesmas e não observamos decaimento ou excitação dos níveis internos de energia. A única transferência de energia nesse caso é na forma de energia cinética. Para uma partícula incidente  $a$  atingindo uma partícula alvo  $b$  o espalhamento elástico assume a forma,

$$a + b \rightarrow a' + b'. \quad (2.1)$$

Nesse tipo de espalhamento, ambos o momento e energia são conservados (podemos dizer que há conservação de quadrimomento). Para o espalhamento inelástico, ao contrário, há uma alteração no nível de energia interno da partícula alvo  $b$ , que, em geral, decai em outras partículas. Nesse processo pode haver liberação de energia da estrutura interna de  $b$ , então podemos ter maior momento do que começamos.

Figura 2.1 – Esquemas demonstrando colisão elástica  $a + b \rightarrow a' + b'$ , e inelástica  $a + b \rightarrow a' + c + d$ .



A medida mais útil para esse tipo de experimento é a seção de choque. Por seção de choque consideramos como uma quantidade experimental de interesse em colisões (GRIFFITHS, 1987). Inicialmente, discutindo sob uma forma clássica, podemos considerar um processo de espalhamento, no qual a partícula entra na região de influência do centro de potencial, o qual possui parâmetro de impacto  $b$ , conforme a Figura 2.2. A partir da geometria apresentada, podemos obter os seguintes diferenciais de área e ângulo sólido, respectivamente,

$$d\sigma = |b db d\phi|, \quad (2.2)$$

$$d\Omega = |\sin \theta d\theta d\phi|. \quad (2.3)$$

Assim, a razão entre as duas é escrita como,

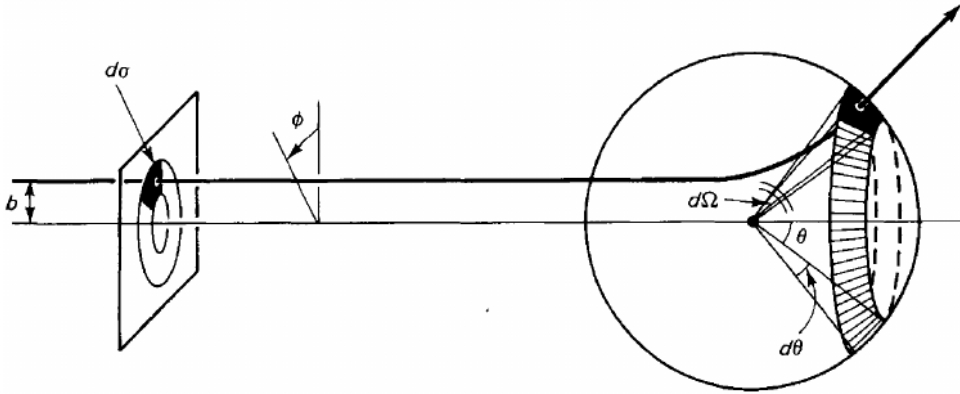
$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \left| \frac{b}{\sin \theta} \frac{db}{d\theta} \right|. \quad (2.4)$$

Aqui, assumimos que o potencial do centro de espalhamento tem simetria azimutal, em  $\phi$ .

A quantidade dada na equação (2.4) é denominada de seção de choque diferencial (GRIFFITHS, 1987). A seção de choque total será a seção de choque diferencial integrada sobre todo o ângulo sólido  $\Omega$  sendo ela dada por,

$$\sigma = \int \frac{d\sigma}{d\Omega} \sin \theta d\theta d\phi. \quad (2.5)$$

Figura 2.2 – Área diferencial  $d\sigma$  indicada com centro de espalhamento estático com parâmetro de impacto  $b$ . A partícula é espalhada em um elemento diferencial de ângulo sólido  $d\Omega$ .



Fonte: Retirado de (GRIFFITHS, 1987)

Agora, vamos considerar um feixe de  $N$  partículas monoenergéticas (de mesma energia), todas sendo lançadas contra um dado centro de espalhamento. A luminosidade  $\mathcal{L}$  é definida como a quantidade de partícula que atravessam a região de espalhamento por unidade de área e unidade de tempo. Assim, a quantidade de partículas que atravessam a área  $d\sigma$  por unidade de tempo é dada por,

$$dN = \mathcal{L} d\sigma. \quad (2.6)$$

Disso segue que,

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{1}{\mathcal{L}} \frac{dN}{d\Omega}. \quad (2.7)$$

Essa acaba sendo uma maneira mais útil de escrevermos a seção de choque diferencial. Sendo assim, o número de partículas espalhadas em um ângulo sólido  $d\Omega$  dividido por  $d\Omega$  e pela luminosidade.

## 2.1 Regra de Ouro de Fermi

A apresentação da seção de choque foi dada a partir de um ponto de vista geométrico que, por ser simples, apresenta uma forma rápida de compreensão.

## REFERÊNCIAS

BALTZ, A.J. *et al.* The physics of ultraperipheral collisions at the LHC. **Physics Reports**, v. 458, n. 1, p. 1–171, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2007.12.001>. ISSN 0370-1573.

BAUR, G.; HENCKEN, K.; TRAUTMANN, D. Photon-photon physics in very peripheral collisions of relativistic heavy ions. **Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics**, v. 24, n. 9, p. 1657, sep 1998. DOI: 10.1088/0954-3899/24/9/003. Disponível em: <https://dx.doi.org/10.1088/0954-3899/24/9/003>.

BERTULANI, C. A.; KLEIN, S. R.; NYSTRAND, J. Physics of ultra-peripheral nuclear collisions. **Annual Review of Nuclear and Particle Science**, v. 55, n. 1, p. 271–310, 2005. DOI: 10.1146/annurev.nucl.55.090704.151526.

BOHR, N. II. On the theory of the decrease of velocity of moving electrified particles on passing through matter. **The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science**, Taylor & Francis, v. 25, n. 145, p. 10–31, 1913. DOI: 10.1080/14786440108634305.

FERMI, E. Über die theorie des stoßes zwischen atomen und elektrisch geladenen teilchen. **Zeitschrift für Physik**, v. 29, n. 1, p. 315–327, Dec 1924. DOI: 10.1007/BF03184853. ISSN 0044-3328.

GRIFFITHS, D. **Introduction to Elementary Particles**. [s. l.]: John Wiley & Sons, INC., 1987.

HARLAND-LANG, L. A. Exciting ions: A systematic treatment of ultraperipheral heavy ion collisions with nuclear breakup. **Physical Review D**, American Physical Society, v. 107, p. 093004, May 2023. DOI: 10.1103/PhysRevD.107.093004.

POVH, B. *et al.* **Particles and Nuclei: An Introduction to the Physical Concepts**. 6. ed. [s. l.]: Springer Berlin Heidelberg, 2012. ISBN 9783642877780.

THOMSON, M. **Modern Particle Physics**. 1. ed. [s. l.]: Cambridge University Press, 2013.

WILLIAMS, E.J. Applications of the Method of Impact Parameter in Collisions. **Proceedings of the Royal Society of London Series A**, v. 139, n. 837, p. 163–186, jan. 1933. DOI: 10.1098/rspa.1933.0012.





## APÊNDICES



## **ANEXOS**

