

## PRODUÇÃO DE FÉRMIONS POR FUSÃO DE FÓTONS EM COLISÕES ULTRAPERIFÉRICAS

ÁGATA A. S. PACHECO<sup>1</sup>; WERNER K. SAUTER<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Pelotas – agatapacheco30@gmail.com

<sup>2</sup>Universidade Federal de Pelotas – werner.sauter@ufpel.edu

### 1. INTRODUÇÃO

Colisões de partículas e de íons permanecem como uma das formas mais eficientes em estudar empiricamente as características das partículas fundamentais, entre outras investigações em física de partículas (THOMSON, 2013). Dentre estas, as colisões ultraperiféricas são caracterizadas por terem um alto parâmetro de impacto em relação às dimensões dos íons envolvidos, de forma que é maior que a soma do raio destes íons. Isso implica que a interação dominante nestas colisões é eletromagnética, sendo portanto mediada pela troca de fótons (BALTZ et al., 2008). Dentre os possíveis estudos que podem ser feitos com colisões ultraperiféricas, incluem a distribuição de carga dos íons incidentes, bem como a possibilidade de geração de partículas exóticas além do modelo padrão, como o gráviton, monopolo de Dirac entre outros (SAUTER, 2022).

Dentre os processos possíveis em colisões ultraperiféricas está a interação dos fótons com um dos íons envolvidos na colisão. Caso este seja um núcleo, a interação do fóton pode resultar em uma quebra do núcleo e geração de estados subsequentes como consequência (BERTULANI, 2023). Outro processo, que é de nosso interesse, é em que os fótons virtuais provenientes dos íons se fundam e gerem partículas por meio disso. Por conservação de números quânticos, as partículas que podem ser geradas incluem mésons de spin inteiro ou nulo e pares de léptons (GREINER; REINHARDT, 2009). Na Figura 1 temos indicado o diagrama para o processo  $Z_1 Z_2 \rightarrow Z_1 X Z_2$  mediado pela fusão de fótons dos íons  $Z_1$  e  $Z_2$ .

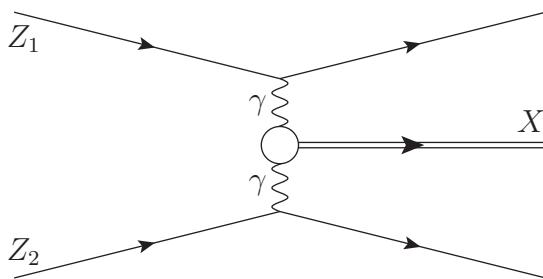


Figura 1: Processo de fusão de fótons e geração de um estado final  $X$ .

Uma vez que as colisões em que estes eventos ocorrem possuem velocidades ultrarrelativísticas, é viável o tratamento do problema pela aproximação dos fótons equivalentes. Como um resultado da contração de Lorentz dos campos, estes podem ser aproximados por pulsos de onda, o que permite que possamos obter o espectro de frequência dos fótons pela transformada de Fourier do campo

elétrico do campo elétrico do íon no referencial do alvo (JACKSON, 1999). Ainda, esta aproximação presume que a distribuição de carga dos íons é homogênea (CARUSO, 2009), o que pode não ser tão útil no caso de prótons, cuja distribuição de carga não pode ser aproximada como homogênea de maneira satisfatória. Outra forma, portanto, de obter o fluxo de fótons, é considerar outros fatores de forma no cálculo do fluxo. Nesse sentido, o estudo da seção de choque em colisões ultra-periféricas fornece uma forma de estudar a distribuição de carga a partir de dados experimentais.

## 2. METODOLOGIA

Como afirmado, a seção de choque para o processo total, como expresso no diagrama da Figura 1, pode ser fatorada em termos da seção de choque da fusão de fótons e dos espectros de fótons de cada íon. Isso é expresso como,

$$\sigma_{Z_1 Z_2 \rightarrow Z_1 Z_2 X} = \iint d\omega_1 d\omega_2 \frac{n(\omega_1)}{\omega_1} \frac{n(\omega_2)}{\omega_2} \sigma_{\gamma\gamma}(\omega_1, \omega_2), \quad (1)$$

em que os  $n(\omega_i)$  são os fluxos de fóton de cada íon e  $\sigma_{\gamma\gamma}$  é a seção de choque do processo  $\gamma\gamma \rightarrow X$ . O fluxo de fóton é calculado como sendo,

$$n(\omega) = \omega \int_{2R_A}^{\infty} N(\omega, b) b \, db, \quad (2)$$

em que  $b$  é o parâmetro de impacto da colisão,  $R_A$  é o raio do íon e,

$$N(\omega, b) = \frac{Z^2 \alpha}{\pi^2} \frac{1}{\omega \beta^2 b^2} \left| \int du u^2 J_1(u) \frac{F[u^2 + \xi^2]}{u^2 + \xi^2} \right|^2, \quad (3)$$

é o fluxo de fótons em termos do fator de forma. Aqui,  $J_1$  é a função de Bessel do primeiro tipo,  $\xi = \omega b / \gamma \beta$  e  $F = F(q^2)$  é o fator de forma do íon, podendo ser tratado como a transformada de Fourier da distribuição de carga. Assumindo uma distribuição homogênea de carga, podemos usar o fluxo de Weiszäcker-Williams,

$$N(\omega, b) = \frac{1}{\pi^2} \frac{Z^2 \alpha}{\beta^2 b^2} \frac{\xi^2}{\omega} \left[ K_1^2(\xi) + \frac{1}{\gamma^2} K_0^2(\xi) \right], \quad (4)$$

em que  $K_0$  e  $K_1$  são funções de Bessel modificadas do segundo tipo (ARFKEN; WEBER; HARRIS, 2017). Inserindo isso na integral da equação (2) fornece,

$$n(\omega) = \frac{2}{\pi} \frac{Z^2 \alpha}{\beta^2} \left\{ \xi_{min} K_0(\xi_{min}) K_1(\xi_{min}) - \frac{\beta^2}{2} [K_1^2(\xi_{min}) - K_0^2(\xi_{min})] \right\} \quad (5)$$

em que  $\xi_{min} = \omega b_{min} / \gamma \beta = \omega R_A / \gamma \beta$ . Em particular o fluxo da equação (5) é particularmente útil como uma aproximação para íons pesados como núcleos de chumbo e ouro que são usados em colisões de partículas.

Tendo isso, iremos considerar a produção de pares de léptons (ou férmions mais geralmente). A seção de choque fundamental do processo  $\gamma\gamma \rightarrow f^+ f^-$  pode ser calculada a partir de teoria quântica de campos como (GREINER; REINHARDT,

2009),

$$\sigma_{\gamma\gamma \rightarrow f^+ f^-}(W_{\gamma\gamma}) = \frac{4\pi\alpha^2}{W_{\gamma\gamma}^2} \left\{ 2 \ln \left[ \frac{W_{\gamma\gamma}}{2m_f} \left( 1 + \sqrt{1 - \frac{4m_f^2}{W_{\gamma\gamma}^2}} \right) \right] \left( 1 + \frac{4m_f^2 W_{\gamma\gamma}^2 - 8m_f^4}{W_{\gamma\gamma}^4} \right) - \sqrt{1 - \frac{4m_f^2}{W_{\gamma\gamma}^2}} \left( 1 + \frac{4m_f^2}{W_{\gamma\gamma}^2} \right) \right\}, \quad (6)$$

em que  $m_f$  é a massa do férmion e  $W_{\gamma\gamma} = \sqrt{4\omega_1\omega_2}$  é a massa invariante do par produzido.

Possuindo então os ingredientes para o cálculo da seção de choque (1), conseguimos obter curvas teóricas usando da biblioteca de computação científica *GNU Scientific Library* (GSL) para C e C++, em particular o algoritmo de quadratura gaussiana adaptativa (QAG) (GALASSI et al., 2021). Com isso, foi possível implementar uma rotina de integração de forma aninhada para a integral dupla em questão.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir da metodologia descrita, conseguimos obter a seção de choque para o processo de produção de diléptons a partir de núcleos de isótopo de chumbo-208. A seção de choque foi calculada numericamente para a produção de pares de férmions em três energias de feixe diferentes. O resultado da curva teórica está na Figura 2. Notavelmente, é esperado que a produção (a seção de choque) diminua para partículas mais massivas, o que é observado na curva.

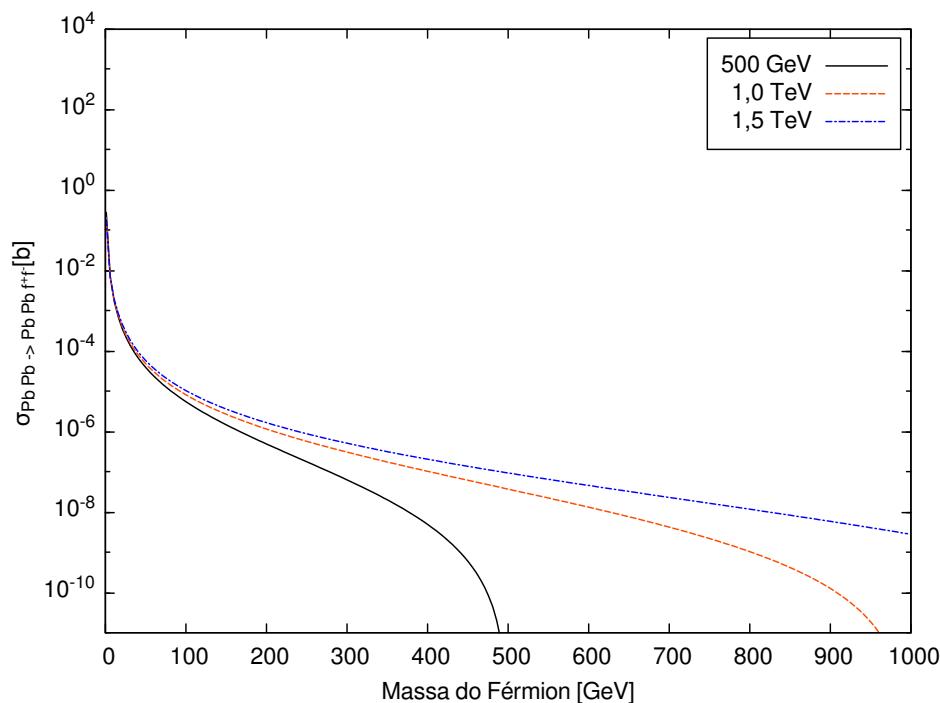


Figura 2: Seção de choque total calculada para o processo  $^{208}\text{Pb}^{208}\text{Pb} \rightarrow ^{208}\text{Pb}^{208}\text{Pb} l^+ l^-$  usando o fluxo (5).

#### 4. CONCLUSÕES

Com o que foi desenvolvido neste trabalho, podemos constatar que as colisões ultraperiféricas permitem um estudo de física de altas energias bastante promissor. Em especial, a produção de diléptons permite um estudo experimental das propriedades dos núcleos incidentes por meio do fator de forma e da seção de choque calculada. Para isso, o desenvolvimento de um ferramental teórico pela aproximação dos fótons equivalentes permite o estudo aproximativo dos fenômenos e da obtenção da seção de choque, que foi realizado aqui. Ainda pretendemos expandir acerca do método apresentado, o qual permite obter a diferencial da seção de choque em termos da distribuição angular das partículas pela parametrização da rapidez na seção de choque. Além disso, estudar outros fatores de forma para distribuições de carga diversas é algo que pretendemos investigar em estudos futuros.

#### REFERÊNCIAS

- ARFKEN, G. B.; WEBER, H. J.; HARRIS, F. **Física Matemática: Métodos Matemáticos para Engenharia e Física**. Amsterdam: Elsevier Editora Ltda., 2017.
- BALTZ, A. et al. The physics of ultraperipheral collisions at the LHC. **Physics Reports**, Amsterdam, v. 458, n. 1, p. 1–171, 2008. ISSN 0370-1573.
- BERTULANI, C. A. **Ultra-peripheral nuclear collisions**. 2023. Disponível em: <<https://arxiv.org/abs/2304.12475>>.
- CARUSO, F. **Sobre o Método de Weiszäcker-Williams e suas Primeiras Aplicações**. 2009. Monografia do CBPF. CBPF-MO-001/09. Disponível em: <[https://cbpfindex.cbpf.br/publication/\\_pdfs/mo00109.2009\\_07\\_01\\_15\\_36\\_02.pdf](https://cbpfindex.cbpf.br/publication/_pdfs/mo00109.2009_07_01_15_36_02.pdf)>.
- GALASSI, M. et al. **GNU Scientific Library**. 2021. Disponível em: <<https://www.gnu.org/software/gsl/doc/latex/gsl-ref.pdf>>.
- GREINER, W.; REINHARDT, J. **Quantum Electrodynamics**. 4. ed. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2009. ISBN 9783540875604.
- JACKSON, J. D. **Classical Electrodynamics**. 3. ed. Hoboken, Nova Jersey: John Wiley & Sons, INC., 1999.
- SAUTER, W. K. Production of exotic particles in electron-positron collisions. **Brazilian Journal of Physics**, v. 51, n. 18, 2022.
- THOMSON, M. **Modern Particle Physics**. 1. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.