

## ESTADOS LIGADOS DE MONOPOLOS MAGNÉTICOS EM COLISÕES DE ALTA ENERGIA

JOÃO VITOR BULHÕES DA SILVA<sup>1</sup>;  
WERNER KRAMBECK SAUTER<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Pelotas – joaovitor1729@gmail.com

<sup>2</sup>Universidade Federal de Pelotas – werner.sauter@gmail.com

### 1. INTRODUÇÃO

Monopolos magnéticos tem sido motivo de grande curiosidade desde o surgimento da teoria eletromagnética. As equações de Maxwell tornam-se mais simétricas num cenário onde existe cargas magnéticas. Em um de seus trabalhos, Dirac mostrou que um único monopolo é capaz de explicar a quantização de carga elétrica (DIRAC, 1931). A expressão para essa quantização é chamada de Condição de Quantização de Dirac (DQC), e é expressa por:

$$eg = \frac{n}{2}, \quad (1)$$

onde  $e$  é carga elétrica,  $g$  é a carga magnética e  $n$  é um inteiro, e usamos unidades naturais,  $\hbar = c = 1$ .

Apesar dos grandes esforços feitos para detectar monopolos magnéticos, até o presente momento ainda não foi observado a existência dessa partícula em experimentos nos aceleradores, e a explicação para essa falta de evidência foi dada pela primeira vez em (HILL, 1983), onde foi assumido que monopolos não podem ser detectados livremente devido ao forte acoplamento magnético, ou seja, só seria possível observar essa partícula em um par monopolo-antimonopolo, que estaria sempre em um estado ligado, mais conhecido como monopolium.

A magnitude da força atrativa entre dois pólos de cargas magnéticas opostas é de  $(68,5)^2 \approx 4692,25$  vezes maior que a força de atração entre o próton e o elétron, em consequência a esse alto valor para a força atrativa temos que talvez essa seja a explicação do por que monopolos não são observados livremente, isso se dá pelo fato dos mesmos estarem confinados pela alta força magnética entre eles, formando o monopolium.

### 2. METODOLOGIA

Nos delimitamos ao estudo de monopolos magnéticos como férmions de spin  $1/2$ , vamos considerar a produção central exclusiva, ou seja, os projéteis não se dissociam e a partícula é produzida na região central do detector. Através dos trabalhos de (WEIZSACKER, 1934) e (WILLIAMS, 1934) usamos da aproximação de fótons equivalentes, onde uma partícula carregada em grandes velocidades é capaz de gerar, em uma região transversal ao seu movimento, campos elétricos e magnéticos intensos, sendo possível substituí-los por um fluxo de fótons equivalentes.

De acordo com (EPELE *et al.*, 2008; EPELE *et al.*, 2009) acredita-se que monopolos podem ser mais facilmente detectados no estado ligado do que livres. Com isso, considerando o par monopolo-antimonopolo, espera-se que devido a forte interação muitos pares se aniquilam em fótons ou após a formação do esta-

do ligado os mesmos também se aniquilem produzindo fótons. Em especial, vamos estudar a produção de estados ligados de monopolos magnéticos via fusão de fótons em colisões de alta energia para colisões de íons pesados com energias disponíveis em experimentos em funcionamento.

A seção de choque de produção do monopolium via fusão de fótons (EPELE *et al.*, 2012) é

$$\sigma(\gamma\gamma \rightarrow M) = \frac{4\pi}{\hat{s}} \frac{M^2 \Gamma(\sqrt{\hat{s}}) \Gamma_M}{(\hat{s} - M^2)^2 + M^2 \Gamma_M^2} \quad (2)$$

onde  $M$  é a massa do monopolium,  $\Gamma(\sqrt{\hat{s}})$  é a taxa de produção do monopolium e  $\Gamma_M$  é a taxa com a qual o monopolium decai. De acordo com (ALLANACH *et al.* 2000) o valor escolhido para taxa de decaimento do monopolium é 10 GeV. A expressão para a taxa de produção do monopolium é a mesma que descreve o positrônio decaindo em dois fótons (JAUCH; ROHRLICH, 1976), ou seja

$$\Gamma = \frac{1}{2\pi} \int |\mathcal{M}|^2 \delta(k_1 + k_2 - p - q) d^3 k_1 d^3 k_2 = |\mathcal{M}|^2 m^2, \quad (3)$$

onde a amplitude de espalhamento é dada por

$$|\mathcal{M}|^2 = \frac{8\pi\alpha_{el}^2}{m^4} |\psi(0)|^2, \quad (4)$$

trocando o acoplamento, temos

$$|\mathcal{M}|^2 = \frac{8\pi\alpha_{mag}^2}{m^4} |\psi(0)|^2, \quad (5)$$

sendo assim, a equação (3) poderá ser reescrita como

$$\Gamma(\sqrt{\hat{s}}) = \frac{8\pi\alpha_{mag}^2}{m^2} |\psi_M(0)|^2 \quad (6)$$

A função de onda será calculada numericamente, onde iremos considerar um potencial  $V(r)$  do tipo Cornell, ou seja:

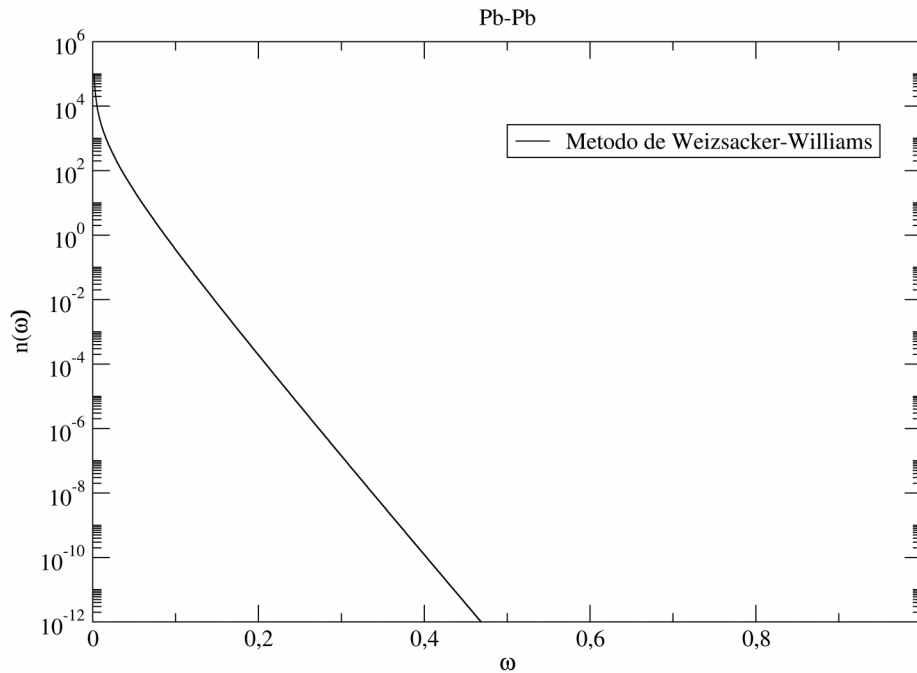
$$V(r) = \frac{g^2}{4\pi} \left( r - \frac{1}{r} \right), \quad (7)$$

A seção de choque para a produção do monopolium será calculada para uma colisão chumbo-chumbo, sendo assim usamos o método de Weizsacker-Williams para caracterizar o espectro de fótons equivalentes, temos então que

$$n(\omega) = f(x) = \frac{2}{\pi} \frac{Z^2 \alpha_{el}}{v^2} \frac{1}{x} \left[ u K_0(u) K_1(u) - \frac{v^2 u^2}{2} (K_1^2(u) - K_0^2(u)) \right]$$

de acordo com a Figura 1, podemos perceber que o número de fótons é alto para fótons de baixa energia, por outro lado, quando tem-se fótons com energia mais alta, essa quantidade decai rapidamente.

Figura 1: Número de fótons equivalentes para o cumbo.



Como iremos tratar de colisões periféricas, o processo de interação será apenas eletromagnético, logo, a seção de choque de uma colisão elástica é expressa como

$$\sigma_{el} = \int dx_1 f(x_1) \int dx_2 f(x_2) \sigma_{\gamma\gamma}(\hat{s}).$$

O experimento MOEDAL (PINFOLD, 2010) tem como finalidade coletar dados sobre a produção de monopolos magnéticos e esperamos que o mecanismo de fusão de fótons possa fornecer um sinal claro na produção do monopolium.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A depender da função de onda que for usada para representar o monopolium, a seção de choque pode ser maior (REIS, 2016). Nesse sentido, o próximo passo para este trabalho é encontrar o valor numérico para a função de onda, pois não existe solução analítica para a função de onda com um potencial de interação do tipo Cornell. Consequentemente, iremos obter o valor para energia de ligação do estado fundamental do sistema, possibilitando determinar o valor para a massa do monopolium.

Toda interação do monopolium é proveniente da dualidade eletromagnética. Através dessa dualidade tratamos o monopolium como um pósitron interagindo eletromagneticamente com um elétron, o que fizemos foi usar uma técnica válida, na qual realizamos a troca do acoplamento eletromagnético pelo acoplamento do monopolo com o fóton.

### 4. CONCLUSÕES

A descoberta de monopolos pode levar a consequências fenomenológicas emocionantes, e também implicações significativas para observáveis

cosmológicos, incluindo bariogênese e onda gravitacionais. O forte acoplamento leva à possibilidade de monopolos serem produzidos no seu estado ligado, o monopolium.

## 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

DIRAC, P. A. M. Quatified singularities in the electromagnetic fields. **Proceedings of the Royal Society of London**, v. 133, n. 821, p. 60–72, 1931.

PRESKILL, John. Magnetic monopoles. **Ann. Rev. Nucl. Part. Sci.**, v. 34, p. 461–530, 1984. DOI:10.1146/annurev.ns.34.120184.002333.

HILL, Christopher T. Monopolonium. **Nucl. Phys. B**, v. 224, p. 469–490, 1983. DOI: 10.1016/0550-3213(83)90386-3.

WEIZSACKER, C.F. von. Radiation emitted in collisions of very fast electrons. **Z.Phys.**, v. 88, p. 612–625, 1934. DOI: 10.1007/BF01333110.

WILLIAMS, E.J. Nature of the high-energy particles of penetrating radiation and status of ionization and radiation formulae. **Phys.Rev.**, v. 45, p. 729–730, 1934. DOI: 10.1103/PhysRev.45.729.

EPELE, Luis N. et al. Monopolium production from photon fusion at the Large Hadron Collider. **Eur.Phys.J.**, C62, p. 587–592, 2009. DOI: 10.1140/epjc/s10052-009-1069-0.

EPELE, Luis N et al. Looking for magnetic monopoles at LHC with diphoton events. **The European Physical Journal Plus**, Springer, v. 127, n. 5, p. 1–15, 2012.

MULHEARN, Michael James. A direct search for Dirac magnetic monopoles. [s. l.], 2004.

JAUCH, J. M.; ROHRICH, F. The theory of photons and electrons. The relativistic quantum field theory of charged particles with spin one-half. 2nd ed.. ed. Berlin: **Springer**, 1976. (Texts and Monographs in Physics). ISBN 978-3-642-80953-8, 978-3-642-80951-4.

ALLANACH, Ben C et al. Searching for narrow graviton resonances with the ATLAS detector at the large hadron collider. **Journal of High Energy Physics**, IOP Publishing, v. 2000, n. 09, p. 019, 2000.

PINFOLD, J. MoEDAL becomes the LHC's magnificent seventh. **CERN Courier**, v. 50N4, p. 19–20, 2010. 20, 80.

REIS, Jean, **Fotoprodução de monopolos magnéticos e monopolium em colisões de altas energias** 2016, 86p. Dissertação (Mestrado em Física) – Programa de Pós-Graduação em Física, Instituto de Física e Matemática, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2016.