

MODELAGEM MATEMÁTICA E SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA INTERAÇÃO FÓTON-FÓTON EM ALTAS ENERGIAS

Zardo Becker, G., Universidade Federal do Rio Grande, zardobecker@gmail.com

Amaral, J. T., Universidade Federal do Rio Grande, jtamaral@furg.br

1. Introdução

Fótons (γ) são os bósons mediadores da interação eletromagnética e, por não possuírem carga elétrica, não interagem diretamente. No entanto, de acordo com a teoria quântica, fótons podem interagir por meio das flutuações do vácuo. Através destas flutuações dois fótons podem interagir e produzir no estado final léptons ou hádrons. A reação $\gamma\gamma \rightarrow \text{hádrons}$, por envolver partículas constituídas de quarks (no caso dos bárions) e pares quark-antiquark (no caso dos mésons), deve ser bem compreendida com base na Cromodinâmica Quântica (QCD), a teoria que descreve a interação nuclear forte em termos de quarks - férmions que, além de carga elétrica, possuem carga de cor - e glúons - bósons mediadores da interação forte, que possuem cor líquida e, portanto, interagem diretamente.

Uma das formas de se estudar a interação fóton-fóton é através de colisões elétron-pósitron que pôde ser intensamente estudando pelo Grande Acelerador Linear Elétron-Pósitron (LEP), um dos principais laboratórios da área, utilizado entre os anos 1989 e 2000. Neste trabalho, obtêm-se um interesse particular sobre o processo descrito pela reação $e^-e^+ \rightarrow e^-e^+\gamma^*\gamma^* \rightarrow e^-e^+X$, representado esquematicamente na Fig. 1: a interação e^-e^+ é mediada por dois fótons virtuais (γ^*), resultando em um estado final hadrônico X e o par e^-e^+ . Este processo é amplamente discutido por KOLANOSKI, 1984 e KIENZLE-FOCACCI et al, 2001.

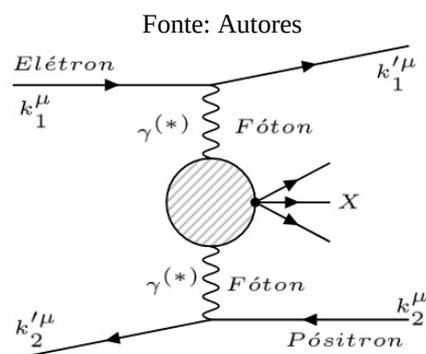


Figura 4 – Representação esquemática da reação $e^+e^- \rightarrow e^+e^-\gamma^*\gamma^* \rightarrow e^+e^-X$.

O LEP deu lugar ao Grande Colisor de Hádrons (LHC), mas há a previsão de novos aceleradores num futuro próximo, entre eles o Colisor Linear Internacional

(ILC) (BAER et al, 2013), que deve alcançar energias de centro de massa bem próximas a 1 TeV, muito além do limite do LEP, em torno de 0,15 TeV. Estima-se que as informações provenientes destes futuros laboratórios, possam melhor elucidar os aspectos físicos envolvidos na interação fóton-fóton e àqueles que decorrem deste processo, como a produção de Bóson de Higgs (ASNER, 2003), física além do modelo padrão (GOUNARIS, 1999) e interações entre fóton-gráviton (MACHADO, 2017). Isso torna a investigação da interação fóton-fóton ainda uma área pujante e de pleno interesse científico.

Um dos modelos utilizados no estudo da interação fóton-fóton é o modelo de dipolos (MUELLER, 1994). TÎMNEANU et al, 2001, aplicaram este modelo ao processo $\gamma^*\gamma^* \rightarrow X$, utilizando para a seção de choque dipolo-dipolo uma extensão do modelo de Golec-Biernat e Wusthoff (GBW) (GOLEC-BIERNAT e WUSTHOFF, 1998), que se baseia na física de saturação (KOVCHegov, 2013) e é expresso no espaço de coordenadas. Neste trabalho, desenvolve-se uma abordagem no espaço de momentum para a interação entre dois fótons, utilizando o modelo proposto por Amaral, Gay Ducati, Betemps e Soyez (AGBS) (AMARAL et al, 2007). Em particular, aplica-se o modelo AGBS ao estudo do comportamento da seção de choque da interação fóton-fóton, em relação a evolução da energia e para o caso em que os fótons são quase reais. Neste estudo são incluídas as contribuições de quarks pesados (*charm* e *bottom*). Inclusive, os resultados obtidos são comparados com os de outros modelos no espaço de coordenadas.

2. Interação fóton-fóton no modelo de dipolos

A aplicação do modelo de dipolos à interação de dois fótons é similar ao que é feito no caso do espalhamento profundamente Inelástico (DIS) (DEVENISH, 2004) entre um elétron (lépton) e um próton (hádron), representado de forma diagramática na Fig. 2. O elétron, com momentum k^μ interage com o próton por meio da troca de um fóton virtual com momentum $q^\mu = k^\mu - k'^\mu$. No estado final desta interação, há o elétron e um estado hadrônico X .

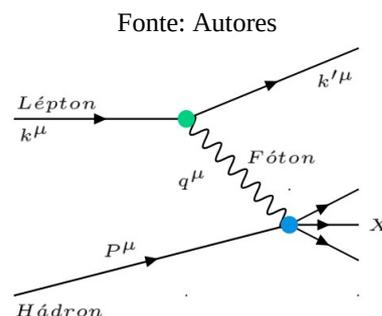


Figura 2 – Diagrama do Espalhamento Profundamente Inelástico.

Usualmente se estuda a parte inferior da interação descrita na Fig. 2, ou seja, a interação fóton virtual-próton resultando no estado final X (reação $\gamma^*p \rightarrow X$). Este processo depende de duas variáveis cinemáticas, as mais comuns sendo (i) a chamada virtualidade do fóton $Q^2 = -q^2$, que fornece uma medida da resolução com a qual o fóton sonda o próton, e (ii) a variável x de Bjorken, $x = Q^2/(s+Q^2)$, que tende a pequenos valores a medida que cresce a energia do centro de massa do sistema γ^*p , (\sqrt{s}) - com Q^2 fixo Também é usual utilizar a rapidez $Y = \ln(1/x)$.

No modelo de dipolos, o fóton virtual possui energia suficiente para se separar em um par quark-antiquark, um dipolo, e este interage com o próton (Fig. 3).

Fonte: Autores

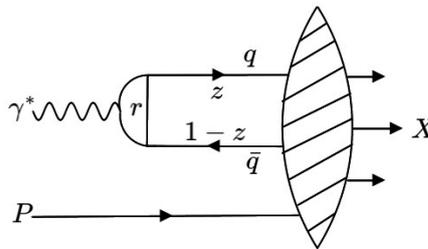


Figura 3 – DIS no modelo de dipolos.

A seção de choque total do processo $\gamma^*p \rightarrow X$ é dada por,

$$\sigma^{\gamma^*p}(x, Q^2) = \sum_{a=1}^{N_f} \sum_{\alpha=T,L} \int d^2r \int dz |\psi_{\alpha}^a(r, z, Q^2)|^2 \sigma_{dp}(r, x)$$

onde r é o tamanho transversal do dipolo e z ($1-z$) é a fração do momentum do fóton carregada pelo quark (antiquark). $|\psi|^2$ é o modulo ao quadrado da função de onda que descreve a flutuação do fóton, transversal (T) e longitudinal (L), em um dipolo, obtida pela QED (NIKOLAEV e ZAKHAROV, 1991) e σ_{dp} é a seção de choque dipolo-próton, que carrega a informação da interação forte, regida pela QCD. N_f é o número de sabores dos quarks.

No modelo de dipolos, pode-se generalizar o tratamento descrito anteriormente para o DIS, ou seja, tem-se que a interação fóton-fóton pode ser descrita em termos da interação dipolo-dipolo, como representado na Fig. 4.

Fonte: Autores

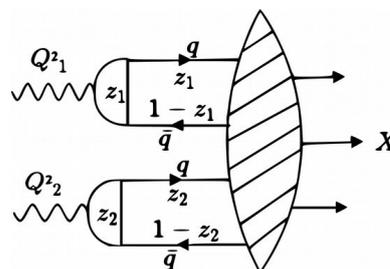


Figura 4 – Interação fóton-fóton no modelo de dipolos.

Onde dois fótons com virtualidades $Q_{1,2}^2$ se separam em dois dipolos com tamanhos transversais $r_{1,2}$. As variáveis $z_{1,2}$ e $(1-z_{1,2})$ correspondem às frações de momentum dos fótons carregadas pelos quarks e antiquarks dos dipolos, respectivamente. Os dois dipolos interagem pela troca de glúons e produzem o estado final hadrônico X .

Uma fórmula para a seção de choque total da interação fóton-fóton, que leva em conta a troca de graus de liberdade gluônicos é (TÍMNEANU et al, 2001):

$$\sigma_{\alpha\beta}(W^2, Q_1^2, Q_2^2) = \sum_{a,b=1}^{N_f} \int dz_1 \int d^2 r_1 |\psi_\alpha^a(z_1, r_1)|^2 \int dz_2 \int d^2 r_2 |\psi_\beta^b(z_2, r_2)|^2 \sigma_{a,b}^{dd}(r_1, r_2, Y), \quad (1)$$

onde W^2 é o quadrado da energia de centro de massa do sistema fóton-fóton, Y é a rapidez do processo e σ^{dd} é a seção de choque dipolo-dipolo, que deve ser modelada.

4. Seção de choque dipolo-dipolo

GONÇALVES et al, 2011, propuseram a seguinte expressão para a seção de choque dipolo-dipolo,

$$\sigma_{a,b}^{dd}(r_1, r_2, Y) = 2\pi r_1^2 T(r_2, Y_2) \theta(r_1 - r_2) + 2\pi r_2^2 T(r_1, Y_1) \theta(r_2 - r_1), \quad (2)$$

onde $\theta(r)$ é a função de Heaviside e $T(r, Y)$ é a amplitude de espalhamento dipolo-próton, que por sua vez é solução da equação de Balitsky-Kovchegov (BK) (KOVCHGOV, 1999), uma equação integro-diferencial que não possui solução analítica exata. Alguns modelos para $T(r, Y)$ se baseiam em soluções assintóticas da equação BK, por exemplo o modelo proposto por Iancu, Itakura e Munier (IIM), que foi atualizado por Soyez (SOYEZ, 2007), sendo este chamado de modelo IIMS. É possível trabalhar com a amplitude no espaço de momentum, $\tilde{T}(k, Y)$, que se relaciona com a amplitude no espaço de coordenadas pela seguinte transformada de Fourier:

$$T(r, Y) = r^2 \int_0^\infty dk J_0(kr) \tilde{T}(k, Y) \quad (3)$$

Na literatura, o único modelo para a amplitude $\tilde{T}(k, Y)$ é o proposto por Amaral, Gay Ducati, Betemps e Soyez (AMARAL et al, 2007), que se baseia nas soluções de ondas progressivas da equação BK. O sucesso desse modelo para a descrição de observáveis em diversos experimentos (BASSO et al, 2011 e 2013) motiva sua aplicação, pela primeira vez, à interação fóton-fóton. A proposta deste trabalho é a aplicação do modelo AGBS à interação fóton-fóton: insere-se o modelo AGBS na

Eq.(3), o que permite o cálculo de σ^{dd} usando a Eq. (2) e calcula-se a contribuição gluônica através da Eq. (1).

5. Resultados

Apresenta-se aqui, os resultados obtidos para a seção de choque fóton-fóton real ($Q_1 = Q_2 = 0$), que são confrontados com os dados experimentais de L3 (ACCIARRI, 2001) e OPAL (ABBIENDI, 2000). Realiza-se uma comparação entre o modelo AGBS, no espaço de momentum, com outros modelos conhecidos na literatura: o modelo IIMS e a versão mais atual do modelo GBW (GOLEC-BIERNAT e SAPETA, 2018), ambos descritos no espaço de coordenadas. Os parâmetros dos três modelos são mantidos fixos. Seguindo a proposta de GONÇALVES et al, 2011, utiliza-se um corte superior nas integrações em r_1 e r_2 , para que os cálculos se mantenham na região perturbativa: assume-se $r_{\text{máx}} \cong 1/\Lambda$, onde se espera que Λ esteja em torno de 200 MeV, valor estimado para a transição entre a QCD não-perturbativa e a perturbativa. Assim, na presente análise Λ é o único parâmetro livre.

Considera-se as contribuições de quarks leves (*up*, *down* e *strange*) e pesados (*charm* e *bottom*), assim como a chamada contribuição de reggeons (mais detalhes em (TÎMNEANU et al, 2001)), importante apenas na região de baixas energias. Estima-se ainda os comportamentos destes modelos na região de altas energias, que serão alcançadas nos futuros aceleradores elétron-pósitron.

Na Fig. 5 são apresentados os resultados para a seção de choque real em função da energia de centro de massa do sistema fóton-fóton (W). Compara-se os resultados sem (Fig. 5(a)) e com (Fig. 5(b)) a contribuição de reggeons, que possui a maior influência apenas na região de energias mais baixas (abaixo de 60 GeV), como esperado.

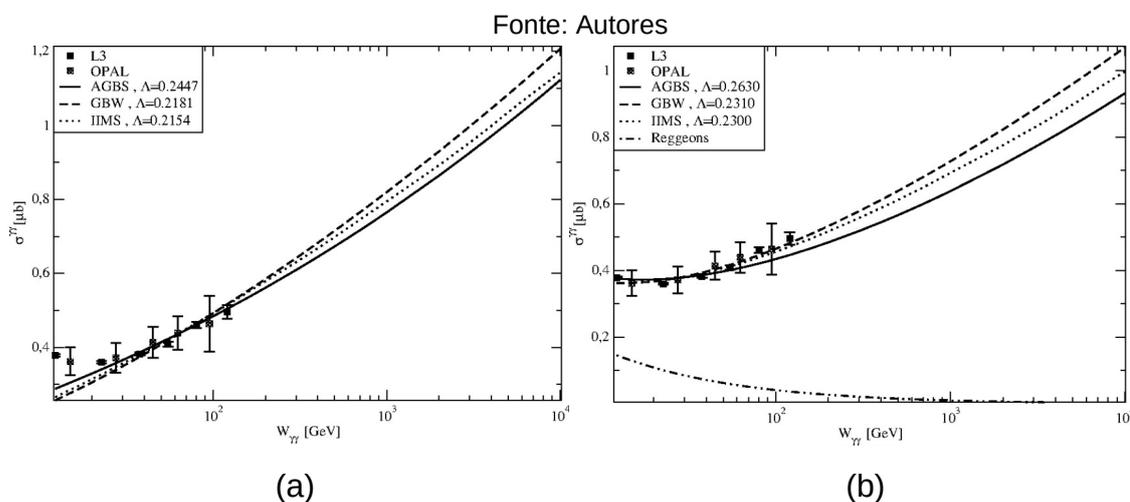


Figura 5 – Secção de Choque fóton-fóton real

Observa-se ainda, que na região de baixas energias os três modelos resultam em comportamentos essencialmente idênticos da seção de choque. Por outro lado, à medida que a energia aumenta, os três modelos se distinguem, e o modelo AGBS permanece abaixo do GBW e IIMS em toda a faixa de energia considerada. No entanto, em torno de 1 TeV, a diferença entre os modelos não é tão grande, de modo que qualquer distinção dependerá da precisão dos dados experimentais dos futuros colisores elétron-pósitron.

6. Conclusão

Com base nos resultados apresentados pode-se observar que, na região onde há dados disponíveis para seção de choque real, não se pode fazer uma distinção entre o modelo AGBS e os modelos GBW e IIMS. Os três modelos fornecem comportamentos similares da seção de choque real, com valores muito próximos para o parâmetro Λ . Em busca de uma análise mais conclusiva é importante a inclusão de outros observáveis, entre eles a seção de choque virtual e a função de estrutura do fóton. Essa extensão do estudo da interação fóton-fóton, usando o modelo AGBS, encontra-se em andamento.

No entanto, mesmo neste estudo preliminar, o modelo AGBS apresentou uma boa concordância com os dados experimentais, podendo ser um bom candidato para descrever as interações fóton-fóton. Por outro lado, na região de mais altas energias, acima de 200 GeV, em que ainda não há dados disponíveis, é possível diferenciar os modelos. Essa diferença, não é tão grande, mesmo em energias em torno de 1 TeV, que serão alcançadas no ILC. Assim, fica claro que a distinção entre os modelos aqui apresentados dependerá da precisão dos dados obtidos em experimentos futuros.

7. Referências

ABBIENDI ,G. et al. [OPAL Collaboration], **Eur. Phys. J. C14** 199, 2000.

ACCIARRI, M. et al. [L3 Collaboration], **Phys. Lett. B519** 33, 2001.

AMARAL J.T.S.; GAY DUCATI, M. B.; BETEMPS, M. A.; SOYEZ, G. γ^*p cross section from the dipole model in momentum space. **Phys. Rev. D76** 094018, 2007.

ASNER, D. et. al. Higgs physics with a $\gamma\gamma$ collider based on CLIC 1. **Eur. Phys. J. C18** 27, 2003.

BAER, H. et al. The International Linear Collider. **Technical Design Report, V.2: Physics**. Arxiv:1306.6352 [hep-ph], 2013.

- BASSO, E. A. F.; GAY DUCATI, M. B.; DE OLIVEIRA, E. G. Inclusive hadron and photon production at the LHC in dipole momentum space **Phys. Rev. D****87**, 074023, 2013.
- BASSO, E. A. F.; GAY DUCATI, M. B.; DE OLIVEIRA, E. G. Momentum space saturation model for deep inelastic scattering and single inclusive hadron production **Phys. Rev. D****84**, 034024, 2011.
- DEVENISH, R. ; COOPER-SARKAR, A. Deep inelastic scattering. **Oxford**, 2004.
- GOLEC-BIERNAT, K.; WUSTHOFF, M. Saturation effects in deep inelastic scattering at low Q^2 and its implications on diffraction. **Phys. Rev. D****59** 014017, 1998.
- GOLEC-BIERNAT, K.; SAPETA, S. Saturation model of DIS: an update. **J. High Energ. Phys.** **1803** 102, 2018.
- GONÇALVES, V. P.; KUGERATSKI, M. S.; CAZAROTO, E. R.; CARVALHO, F.; NAVARRA, F. S. Non-linear QCD dynamics in two-photon interactions at high energies. **Eur. Phys. J.** **C71** 1779, 2011.
- GOUNARIS, G.J. ; PORFYRIADIS, P.I.; RENARD, F.M. The $\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma$ process in the standard and SUSY models at high energies. **Eur. Phys. J.** **C9** 673, 1999.
- KIENZLE-FOCACCI, M. N.; WADHWA, M. Photon 2001: International Conference on the Structure and Interactions of the Photon Including the 14th International Workshop on Photon-Photon Collisions. Singapore, **World Scientific**, 2001
- KOLANOSKI, H. Two-Photon Physics at e^+e^- Storage Rings, **Springer Tracts in Modern Physics V.105**, 1984.
- KOVCHEGOV, Y. V. Introduction do the physics of saturation. **AIP Conf. Proc.** **1520** 3, 2013.
- KOVCHEGOV, Y. V. Small- x F_2 structure function of a nucleus including multiple Pomeron exchanges. **Phys. Rev. D****60** 034008, 1999.
- MACHADO, M. V. T. Graviton production by two-photon processes in TeV-scale gravitational interactions. **Astron. Nachr**, 2017.
- MUELLER, A. H. Soft gluons in the infinite momentum wave function and the BFKL pomeron, **Nucl. Phys.** **B415**, 373, 1994.
- NIKOLAEV, N.N.; ZAKHAROV, B. G. Colour transparency and scaling properties of nuclear shadowing in deep inelastic scattering, **Z. Phys.** **C49**, 607, 1991.
- SOYEZ, G. Saturation QCD predictions with heavy quarks et HERA. **Phys. Lett.** **B655** 32, 2007.
- TÎMNEANU, N.; KWIECIŃSKI, J.; MOTYKA, L. Saturation model for two-photon interactions at high energies. **Eur. Phys. J.** **C23** 513, 2002.