

PRODUÇÃO INCLUSIVA DE D^0 EM COLISÕES ULTRAPERIFÉRICAS DE CHUMBO-CHUMBO NO LHC

LUANA SANTANA¹; WOLFGANG SCHÄFER²; VICTOR PAULO BARROS GONÇALVES³

¹Universidade Federal de Pelotas – luanasntna@gmail.com

²Polish Academy of Sciences (PAN) – Wolfgang.Schafer@ifj.edu.pl

³Universidade Federal de Pelotas – barros@ufpel.edu.br

1. INTRODUÇÃO

O estudo da estrutura nuclear se tornou objeto de grande interesse nas últimas décadas pela possibilidade de investigar a descrição da Cromodinâmica Quântica (QCD) em altas energias nos aceleradores de partículas. Processos exclusivos, em que ambas as partículas incidentes saem intactas na colisão, foram amplamente investigadas nos últimos anos (KOWALSKI; MOTYKA; WATT, 2006; CISEK; SCHÄFER; SZCZUREK, 2011; GONCALVES; MOREIRA; SANTANA, 2023). Entretanto, os processos inclusivos, em que um dos hádrons incidentes quebra, teve seus primeiros dados experimentais apenas publicados recentemente pela colaboração ALICE (AAD *et al*; 2025), do Grande Colisor de Hádrons (LHC), impulsionando o estudo desse tipo de colisão para melhorar nosso conhecimento sobre a distribuição dos constituintes dos prótons e núcleos.

Neste trabalho, motivados pelos recentes dados de produção inclusiva do méson D^0 em colisões ultraperiféricas de chumbo-chumbo (PbPb), disponibilizados pela colaboração CMS (CMS Collaboration, 2024) do LHC, derivamos a seção de choque diferencial do processo $Pb + Pb \rightarrow D^0 + X$ no espaço de momentos, para descrever a dinâmica do núcleo de chumbo em termos da distribuição de glúons não integrada, considerando três modelos com diferentes prescrições da dinâmica. Com o formalismo descrito, comparamos com os dados do CMS e investigamos a sensibilidade da descrição com diferentes observáveis, como as distribuições em rapidez e em momento transversal do méson. Com isso, mostramos que futuras análises experimentais de produção inclusiva de D^0 serão úteis para melhorar nossa compreensão da dinâmica da QCD e a descrição de efeitos nucleares. Os resultados apresentados fazem parte de um trabalho submetido à publicação, cujo *preprint* está disponível em Gonçalves, Santana e Schäfer (2025).

2. METODOLOGIA

Para obter os observáveis de interesse, vamos considerar colisões ultraperiféricas, em que o parâmetro de impacto b é maior que a soma dos raios dos íons incidentes ($b > 2R_{pb}$), sendo $R_{pb} = 7.0$ fm. Um íon é a fonte de fótons A e o outro é o alvo B, e um deles quebra pela interação forte, produzindo um estado final com méson D^0 , formado pelos quarks charm (c) e antiup (\bar{u}), e um estado final X não medido. A seção de choque diferencial para a produção do méson D^0 , com momento transversal $p_{T,D}$ e rapidez Y_D , é

$$\frac{d^2\sigma(Pb + Pb \rightarrow Pb \otimes D^0 + X)}{dY_D d^2p_{T,D}} = \int_{z_{min}}^1 \frac{dz}{z^2} D(z, \mu^2) \int_{x_c}^1 dz_c \frac{x_c}{z_c} f_{\gamma Pb}^{eff} \left(\frac{x_c}{z_c} \right) \frac{d\sigma(\gamma Pb \rightarrow c\bar{c}X)}{dz_c d^2p_T}$$

sendo $x_c = \sqrt{(p_T^2 + m_c^2)/s_{NN}} \exp(+Y_c)$, em que $m_c = 1,4$ GeV é a massa do charm, $Y_c = Y_D$ é a rapidez do charm, $\sqrt{s_{PbPb}} = 5,36$ TeV é a energia de centro de massa da colisão e z, z_c são as frações de momento carregadas pelo méson D^0 e charm, respectivamente. A equação acima é escrita em termos da função de fragmentação de Peterson $D^{D^0/c}$,

$$D^{D^0/c}(z, \mu^2) = \frac{n(D^0)}{z [1 - 1/z - \epsilon_c/(1 - z)]^2}$$

sendo $n(D^0) = 0,308377$ e $\epsilon_c = 0,05$, e do fluxo de fótons vindos do chumbo,

$$f_{\gamma Pb}^{\text{eff}}(x) = \frac{Z^2 \alpha_{em}}{\pi^2 x} \int_{b > 2R_{Pb}} \frac{d^2 \mathbf{b}}{b^2} \left(\frac{\omega b}{\gamma} \right)^2 K_1^2 \left(\frac{\omega b}{\gamma} \right) P(\mathbf{b})$$

em que Z é o número atômico, α_{em} é a constante de estrutura fina, \mathbf{b} é o parâmetro de impacto da colisão, ω é a energia dos fótons emitidos, γ é o fator de Lorentz e K_1 é a função de Bessel modificada de segunda ordem. A probabilidade de um núcleo não emitir nenhum nêutron e dissociar é dada por $P(\mathbf{b}) = \exp(-S/\mathbf{b})$, em que consideramos os casos $P(\mathbf{b}) = 1$, $S = (10.4 \text{ fm})^2$ e $S = (17.4 \text{ fm})^2$. Finalmente, a seção de choque para a produção de charm é dada por

$$\frac{d\sigma(\gamma Pb \rightarrow c\bar{c}X)}{dz_c d^2 \mathbf{p}_T} = \frac{N_c \alpha_{em} e_c^2}{2\pi^2} \int d^2 \mathbf{k} f(x, \mathbf{k}) \left\{ \frac{z_c^2 + (1 - z_c)^2}{2} \left[\frac{\mathbf{p}_T}{p_T^2 + \epsilon^2} - \frac{\mathbf{p}_T + \mathbf{k}}{(\mathbf{p}_T + \mathbf{k})^2 + \epsilon^2} \right]^2 + \frac{m_c^2}{2} \left[\frac{1}{p_T^2 + \epsilon^2} - \frac{1}{(\mathbf{p}_T + \mathbf{k})^2 + \epsilon^2} \right]^2 \right\}$$

na qual N_c é o número de cores, e_c é a fração de carga do charm, $\epsilon^2 = m_c^2$, \mathbf{k} é momento transversal dos glúons dentro dos prótons e $f(x, \mathbf{k})$ é a distribuição de glúons não integrada (UGD), que fornece a dinâmica da interação. Nesse caso, utilizamos três distribuições distintas, listadas na Tabela 1. Uma evolução do tipo linear considera apenas emissões de glúons dentro do próton, enquanto que a evolução não linear considera também recombinação de glúons. Além disso, a CCFM é uma equação desenvolvida para o próton, enquanto que a EPPS foi construída para o chumbo e a rcBK modificada para incluir dependência nuclear.

Tabela 1: Distribuições de glúons não integradas consideradas, com os tipos de evolução e se são considerados efeitos nucleares.

$f(x, \mathbf{k})$	Evolução	Efeitos nucleares?
CCFM	linear	não
EPPS	linear	sim
rcBK	não linear	sim

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 1, apresentamos nossas previsões para as distribuições de rapidez e em momento transversal assumindo os modelos CCFM, EPPS e rcBK e $P(b) = 1$. Vemos que as previsões da CCFM possuem normalização maior, ou seja, não incluir efeitos nucleares implica em uma seção de choque maior quando comparado com a EPPS. Além disso, a rcBK apresenta as menores curvas, com a diferença para a EPPS aumentando para grandes valores de rapidez e momento transversal.

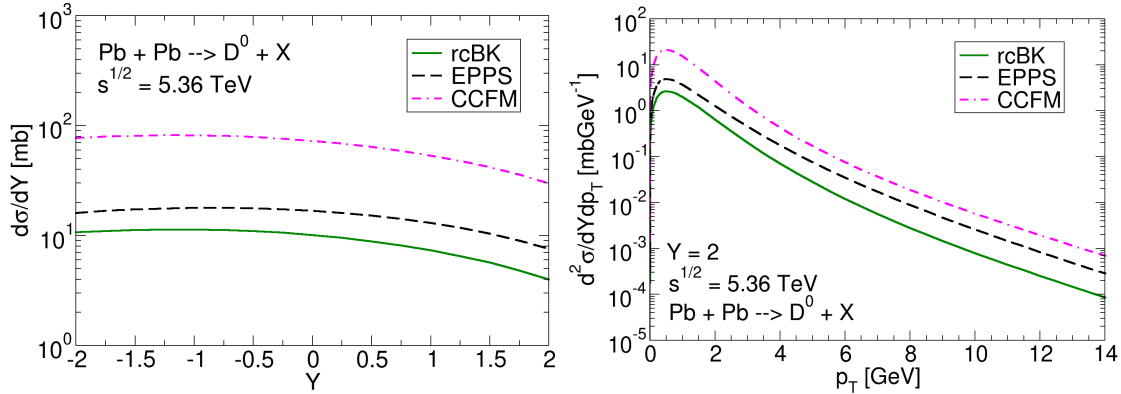


Figura 1: Predições para distribuições de rapidez (painel à esquerda) e momento transversal (painel à direita) para a produção inclusiva de D^0 em colisões PbPb com $\sqrt{s} = 5.36$ TeV assumindo diferentes modelos para a UGD nuclear e $P(b) = 1$.

Na Figura 2, comparamos o formalismo com os dados do CMS. A CCFM, para os dois conjuntos de dados, superestima a seção de choque diferencial ao desconsiderar efeitos nucleares e não descreve bem os dados. Enquanto isso, EPPS e rcBK apontam uma melhor descrição, indicando que efeitos nucleares e/ou efeitos não lineares devem ser incluídos para descrever os dados experimentais.

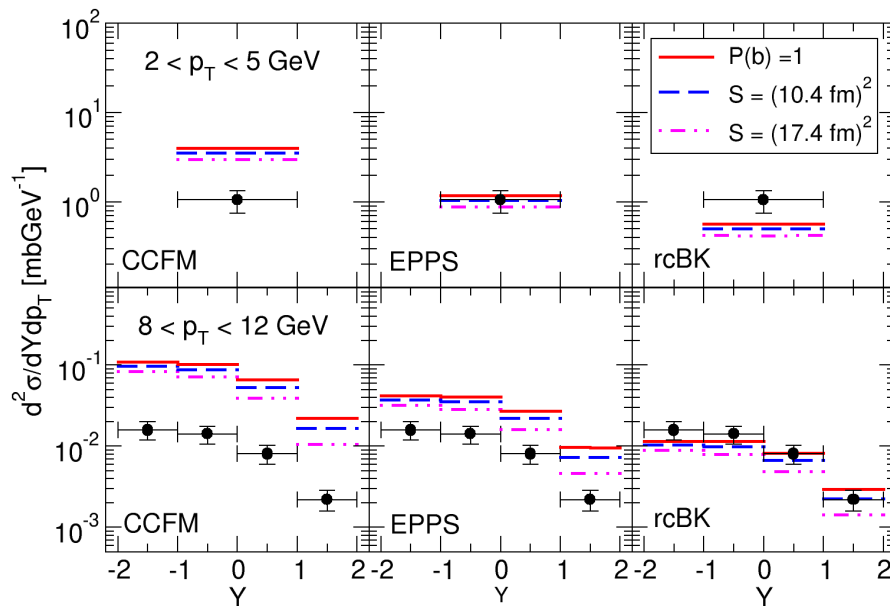


Figura 2: Comparação dos modelos CCFM, EPPS e rcBK com dados de produção de D^0 , da colaboração CMS (CMS Collaboration, 2024). Na primeira linha, os três modelos foram comparados com o intervalo de $2 < p_T < 5$ GeV e na segunda linha com $8 < p_T < 12$ GeV, considerando diferentes configurações de dissociação eletromagnética.

4. CONCLUSÕES

A descrição da dinâmica da QCD em altas energias ainda é um desafio teórico, com modelos disponíveis na literatura que consideram diferentes abordagens no tratamento da densidade gluônica. Neste trabalho, exploramos a produção de D^0 em colisões ultraperiféricas nucleares, para testar as diferentes descrições da dinâmica partônica para o chumbo. Os resultados indicam que os observáveis são bastante sensíveis para as descrições da QCD e efeitos nucleares, e que novos dados podem ajudar a discriminar entre as diferentes UGDs.

Nos próximos passos, investigaremos a produção do méson B^0 , composto pelos quarks down (d) e antibottom (\bar{b}), portanto sendo mais pesado que o D^0 , além de analisar colisões próton-chumbo, de forma a mapear outras regiões cinemáticas possíveis dentro do LHC. Outras possibilidades são de analisar o processo $b \rightarrow D^0$ para comparar com a produção direta $c \rightarrow D^0$ e a produção difrativa desses mésons.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AAD, Georges *et al.* Measurement of photonuclear jet production in ultraperipheral Pb+ Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV with the ATLAS detector. **Physical Review D**, v. 111, n. 5, p. 052006, 2025.

CISEK, Anna; SCHÄFER, Wolfgang; SZCZUREK, Antoni. Exclusive production of vector mesons in γp and pp collisions. **Nuclear Physics B**, v. 219, p. 56-59, 2011.

CMS Collaboration. Constraining nuclear parton dynamics with the first measurement of D^0 -photoproduction in ultraperipheral heavy-ion collisions at the LHC. 2024.

GONCALVES, Victor P.; MOREIRA, Bruno D.; SANTANA, Luana. Exclusive p and J/Ψ photoproduction in ultraperipheral pO and OO collisions at energies available at the CERN Large Hadron Collider. **Physical Review C**, v. 107, n. 5, p. 055205, 2023.

GONCALVES, Victor P.; SANTANA, Luana; SCHÄFER, Wolfgang. Investigating the inclusive D^0 photoproduction in ultraperipheral PbPb collisions at the Large Hadron Collider. **arXiv preprint arXiv:2506.02223**, 2025.

KOWALSKI, Henri; MOTYKA, Leszek; WATT, Graeme. Exclusive diffractive processes at HERA within the dipole picture. **Physical Review D**, v. 74, n. 7, p. 074016, 2006.