

# Estudando a estrutura do próton em colisões no LHC

Phys. Rev. D **113**, 094009 (2026)

arXiv: 2603.24344 [hep-ph]

Ríchard Terra

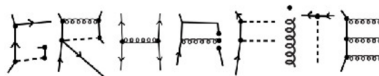
Universidade de São Paulo  
Instituto de Física

**Orientador:**

Prof. Dr. Fernando Silveira Navarra (IFUSP)

**Coorientador:**

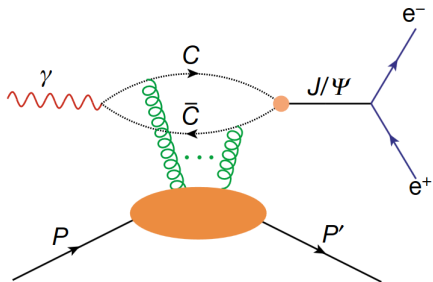
Prof. Dr. André V. Giannini (UFGD)



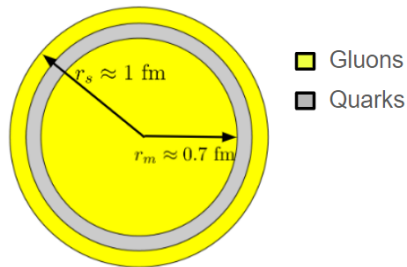
# A estrutura do próton

B. Duran, Z. E. Meziani, S. Joosten *et al.*, Nature **615**, 813 (2023).

- Resultados do JLAB:



(a) Fotoprodução de  $J/\psi$ .

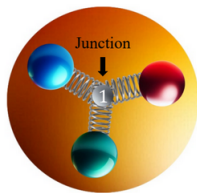


(b) Estrutura gluônica do próton.

Qual é o formato da distribuição de gluons?

# Junção Bariônica

- Nesta visão, os 3 quarks de valência são ligados por um corda de gluons em "Y";
- O ponto central é chamado de "ponto de Fermat".

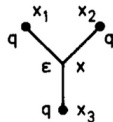


# Por que junção?

G.C. Rossi and G. Veneziano, Phys. Rep. **63**, 153 (1980).

1) O ponto de Fermat é necessário para manter a invariância de gauge da função de onda do próton

$$B_3 = qqq \text{ baryon} \quad \epsilon^{ijk} \left[ \text{P exp} \left( ig \int_{x_1}^x A_\mu dx^\mu \right) q(x_1) \right]_{j_1} \left[ \text{P exp} \left( ig \int_{x_2}^x A_\mu dx^\mu \right) q(x_2) \right]_{j_2} \left[ \text{P exp} \left( ig \int_{x_3}^x A_\mu dx^\mu \right) q(x_3) \right]_{j_3}$$



# Por que junção?

D. S. Kuzmenko and Yu. A. Simonov, Phys. Atom. Nucl. **66**, 950 (2003).

Em contraposição, a função de onda de um baryon em  $\Delta$

$$\psi_{\Delta} \propto \left[ q_{\alpha\beta}(x) \Phi_{\gamma}^{\beta}(x, y) \right] \times \left[ q_{\gamma\delta}(y) \Phi_{\epsilon}^{\delta}(y, z) \right] \times \left[ q_{\epsilon\rho}(z) \Phi_{\alpha}^{\rho}(z, x) \right], \quad (1)$$

com

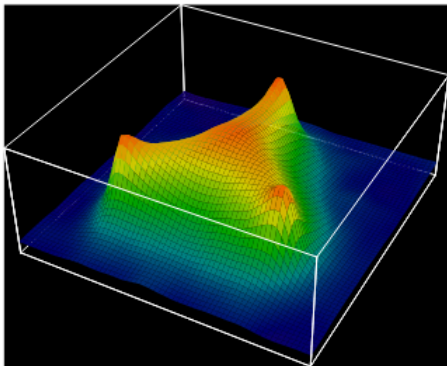
$$q_{\beta\gamma}(x) = \varepsilon_{\alpha\beta\gamma} q^{\alpha}(x) \quad e \quad \Phi_{\alpha}^{\beta}(x, y) = \left( P \exp \left( ig \int A_{\mu}(z) dz_{\mu} \right) \right)_{\alpha}^{\beta} \quad (2)$$

não é invariante à transformação  $q^{\alpha}(x) \rightarrow U_{\beta}^{\alpha}(x) q^{\beta}(x)$

# Por que junção?

H. Suganuma, T. T. Takahashi, F. Okiharu and H. Ichie , AIP Conf. Proc. **756**, 123 (2005).

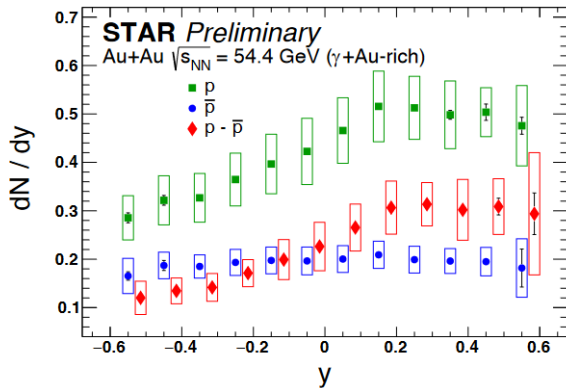
2) Simulações de QCD na rede encontraram tubos de fluxo em "Y":



# Por que junção?

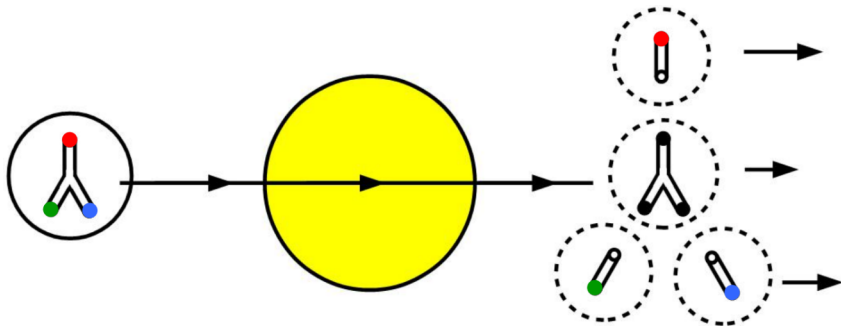
D. Kharzeev, Phys. Lett. B 378, 238 (1996)

3) Apresenta uma explicação para o excesso de prótons na região de midrapidez:



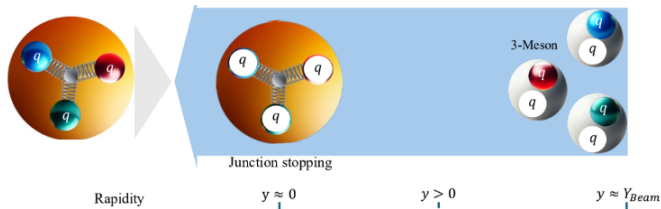
[Star Collaboration], arXiv:2408.15441 [nucl-ex].

- Baryon stopping



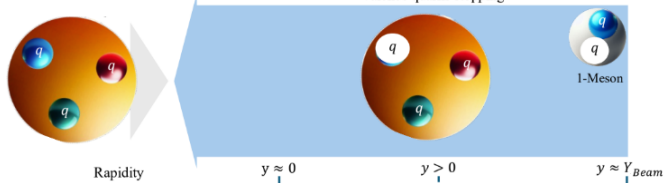
- Com junção:

Baryon Junction.



- Sem junção:

Valence quarks



## Qual é o formato da distribuição de gluons?

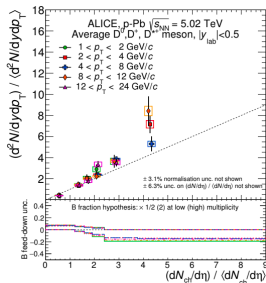
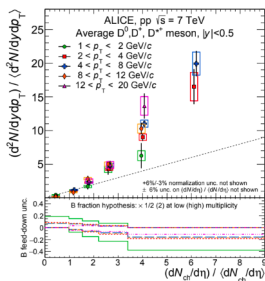
- A junção bariônica é uma conjectura que ainda precisa de confirmação;
- O EIC deve realizar medições mais conclusivas sobre o assunto;
- No momento, estudamos os efeitos da junção sobre dados do LHC ;

# Objetivos

J. Adam *et al.* [ALICE Collaboration], J. High Energ. Phys. **9**, 148 (2015).

J. Adam *et al.* [ALICE Collaboration], J. High Energ. Phys. **08**, 78 (2016).

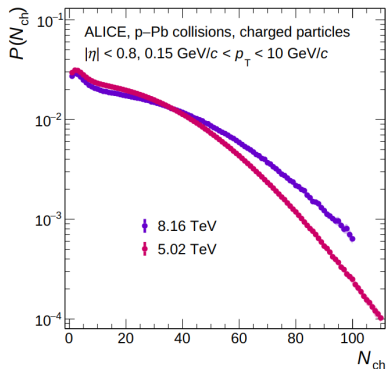
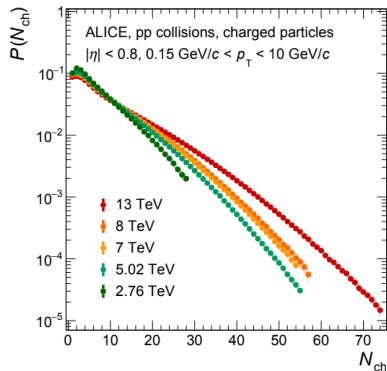
- Usar condições iniciais de junção em colisões pp e pPb;
- Simular as colisões no gerador de eventos MCKT (Monte Carlo + fatorização-kt);
- Explicar yields relativos de mesons D;



# Objetivos

S. Acharya *et al.* [ALICE Collaboration], Phys. Lett. B **853**, 138700 (2024).

- Explicar distribuições de multiplicidade de partículas carregadas;



# Condições iniciais (analítica-BJ1)

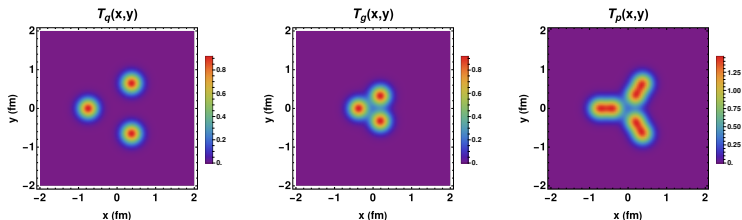
S. Deb, G. Sarwar, D. Thakur, P. Subramani, R. Sahoo and J. e. Alam, Phys. Rev. D **101**, 014004 (2020).

Thickness (densidade integrada em z):

$$T_N(x, y) = T_N^q(x, y) + T_N^g(x, y) \quad (3)$$

$$T_N^q(x, y) = \frac{(1 - \kappa)}{6\pi B_p^2} \sum_{i=1}^3 \exp\left(-\frac{(x - (x_p + x_i))^2 + (y - (y_p + y_i))^2}{2B_p^2}\right) \quad (4)$$

$$T_N^g(x, y) = \frac{\kappa}{6\pi B_p^2} \sum_{i=1}^3 \exp\left(-\frac{(x - (x_p + \frac{x_i}{2}))^2 + (y - (y_p + \frac{y_i}{2}))^2}{2B_p^2}\right) \quad (5)$$



# Condições iniciais (numérica-BJ2)

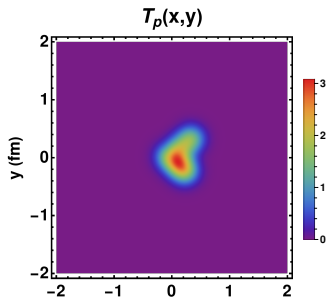
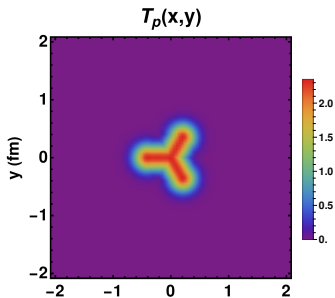
H. Mäntysaari and B. Schenke, Phys. Rev. D 94, 034042 (2016).

1) Posicionamos os três quarks conforme a distribuição:  $P(\mathbf{r}) = \frac{e^{-\frac{\mathbf{r}^2}{2B_r}}}{(2\pi B_r)^{3/2}}$ ,

$$B_r = 0.41^2 \text{ fm}^2;$$

2) Encontramos o ponto de Fermat;

3) Preenchemos os tubos de fluxo com gaussianas:  $B_t = 0.15^2 \text{ fm}^2$ .



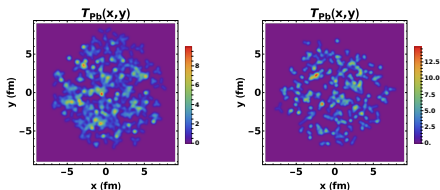
# Condições iniciais (Chumbo)

Posicionamos 208 nucleons conforme:

$$\rho(r) = \rho_0 \frac{1 + w(r/R)^2}{1 + \exp\left(\frac{r-R}{a}\right)}, \quad (6)$$

Thickness:

$$T_{Pb}(x, y) = \sum_{n=1}^{208} T_n(x, y), \quad (7)$$



# Fatorização- $K_T$

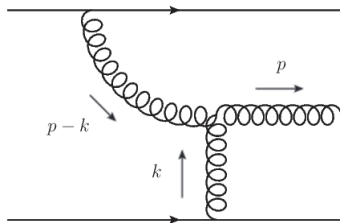
W. A. Horowitz and Y. V. Kovchegov, Nucl. Phys. A **849**, 72 (2011).

A. Dumitru, A. V. Giannini, M. Luzum and Y. Nara, Phys. Lett. B **784**, 417 (2018).

Seção de choque de produção de glúons:

$$\frac{d\sigma^{A+B \rightarrow g}}{dy d^2p_T d^2\mathbf{r}_\perp} = \mathbf{K} \frac{2}{C_F p_T^2} \int^{p_T} \frac{d^2k_T}{4} \int d^2b \alpha_s(Q) \phi_p \left( \frac{|p_T + k_T|}{2}, x_1; b \right) \phi_T \left( \frac{|p_T - k_T|}{2}, x_2; R - b \right)$$

(8)



Cinemática 2  $\rightarrow$  1:

$$x_{1,2} = \frac{p_T}{\sqrt{s}} e^{\pm y} \quad (9)$$

Unintegrated gluon distribution (UGD):

$$\phi_{KLN}(\mathbf{k}, x) = \frac{2C_F}{3\pi^2} \frac{(1-x)^4}{\alpha_s} \begin{cases} 1, & \text{if } k \leq Q_s \\ (Q_s/k)^2, & \text{if } k > Q_s \end{cases} \quad (10)$$

D. Kharzeev, E. Levin and M. Nardi, Phys. Rev. C **71**, 054903 (2005).

Escala de saturação:

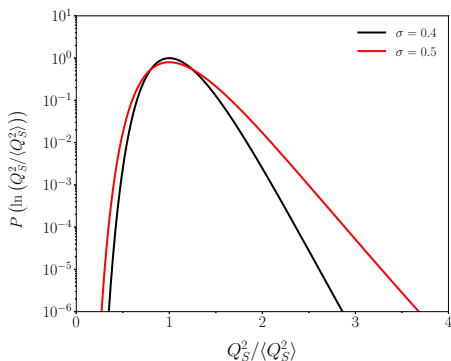
$$Q_s^2(x, \mathbf{r}_\perp) = T(\mathbf{r}_\perp) \frac{2 \text{ GeV}^{-2}}{1.53 \text{ fm}^{-2}} \left( \frac{0.01}{x} \right)^{\bar{\lambda}}, \quad (11)$$

J. L. Albacete, A. Dumitru and Y. Nara, J. Phys.: Conf. **316**, 012011 (2011).

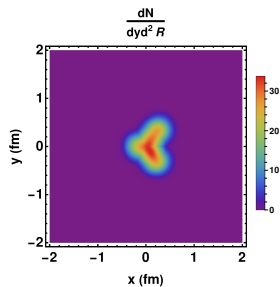
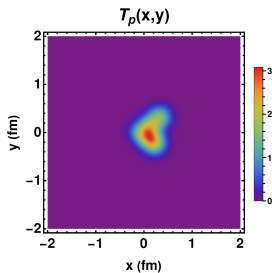
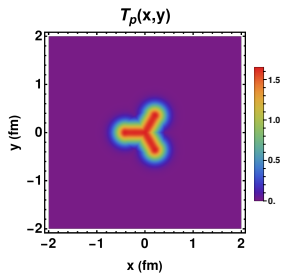
# Flutuações intrínsecas

L. McLerran and P. Tribedy, Nucl. Phys. A 945, 216 (2016)

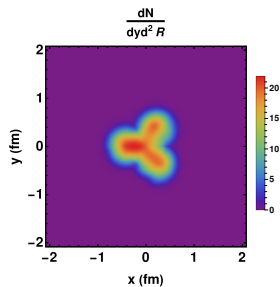
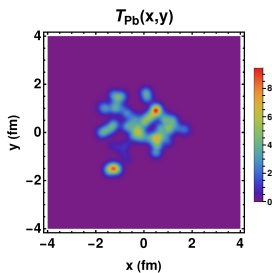
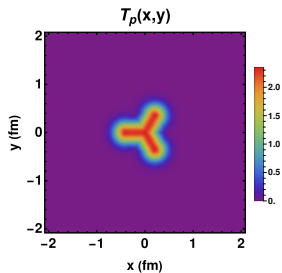
$$P(\ln(Q^2/\langle Q^2 \rangle)) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{\ln^2(Q(\mathbf{s}_\perp)^2/\langle Q(\mathbf{s}_\perp)^2 \rangle)}{2\sigma^2}\right) \quad (12)$$



# Convolução (pp)



# Convolução (pPb)



# Produção

Jacobiano  $y \rightarrow \eta$ :

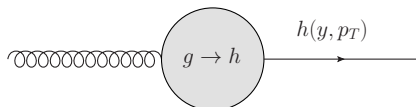
$$\frac{\cosh \eta}{\sqrt{\cosh^2 \eta + m_\pi^2/p_T^2}} \quad (13)$$

Dualidade parton-hadron:

$$N_{ch} \propto N_{gluons} \quad (14)$$

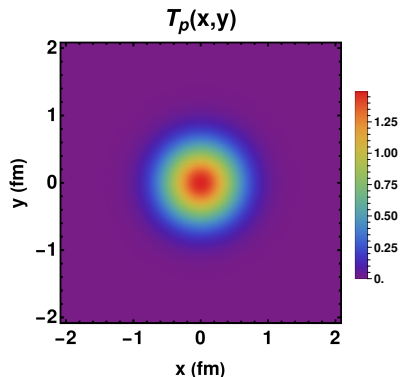
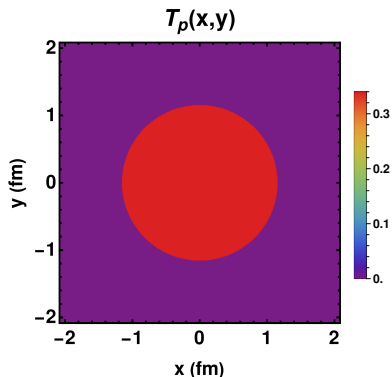
$$\Rightarrow N_{ch} = \int d\eta \int d^2R \frac{dN}{d\eta d^2R} \quad (15)$$

Para um sabor de hadron específico:



# E se não for junção?

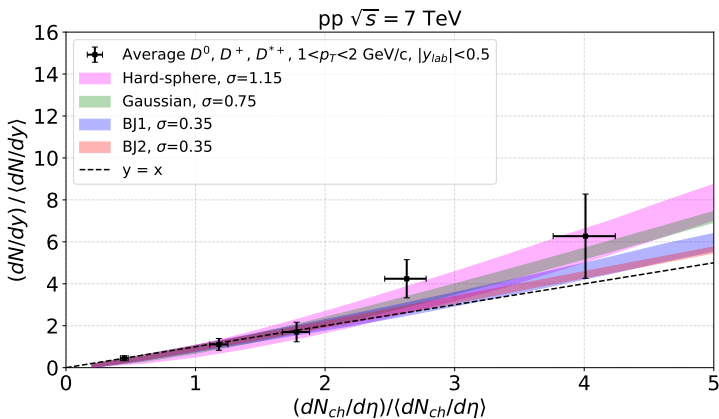
Repetimos o cálculo para condições iniciais de hard-sphere and Gaussiana.



# Resultados (pp)

J.Adam *et al.* [ALICE Collaboration], J. High Energ. Phys. **9**, 148 (2015).

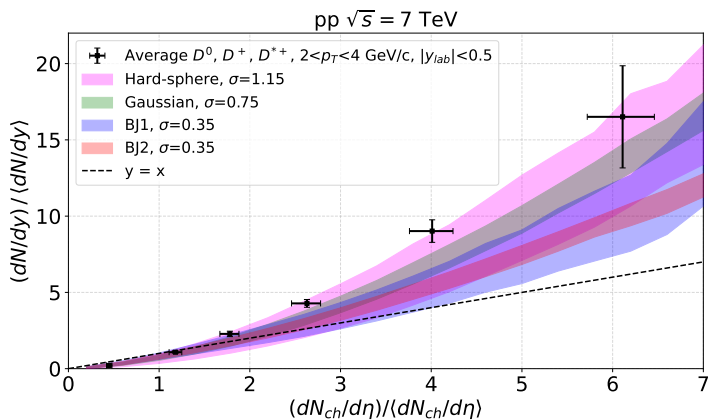
arXiv: 2603.24344 [hep-ph]



# Resultados (pp)

J.Adam *et al.* [ALICE Collaboration], J. High Energ. Phys. **9**, 148 (2015).

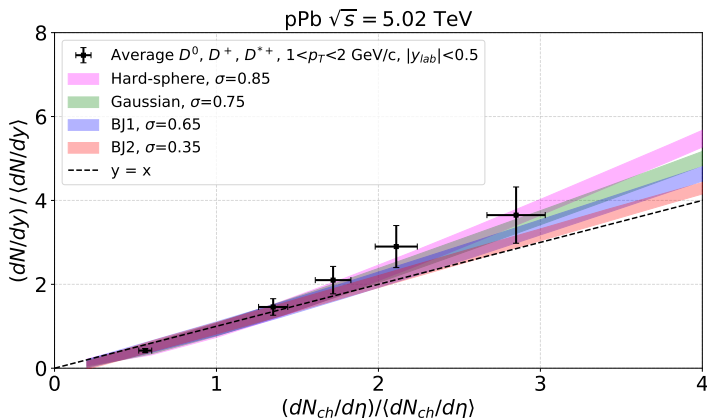
arXiv: 2603.24344 [hep-ph]



# Resultados (pPb)

J. Adam *et al.* [ALICE Collaboration], J. High Energ. Phys. **08**, 78 (2016).

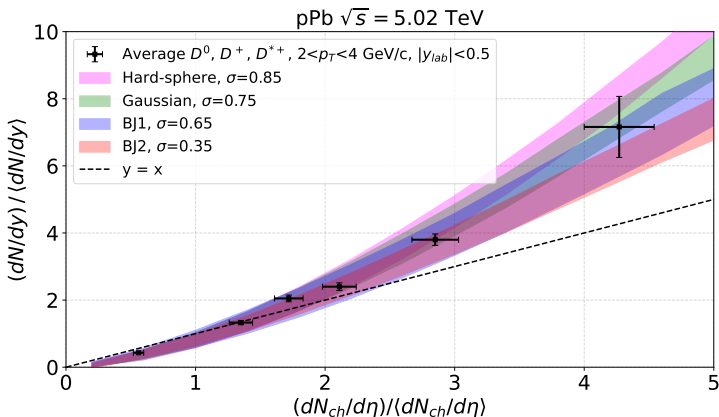
arXiv: 2603.24344 [hep-ph]



# Resultados (pPb)

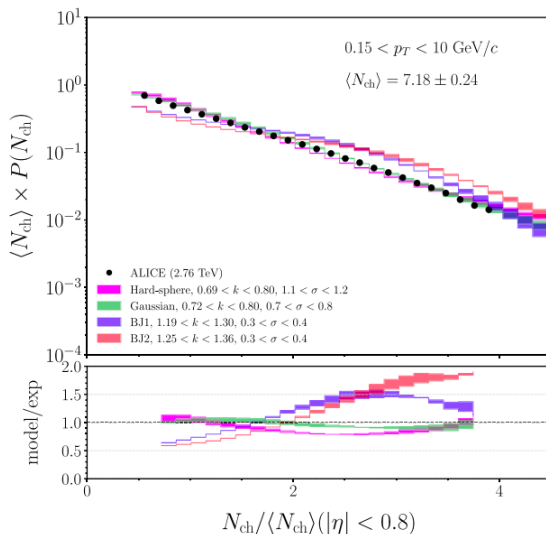
J. Adam *et al.* [ALICE Collaboration], J. High Energ. Phys. **08**, 78 (2016).

arXiv: 2603.24344 [hep-ph]

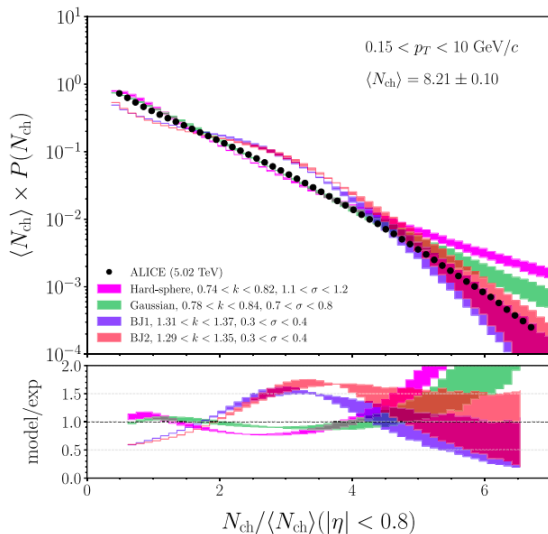


(a) pPb data.

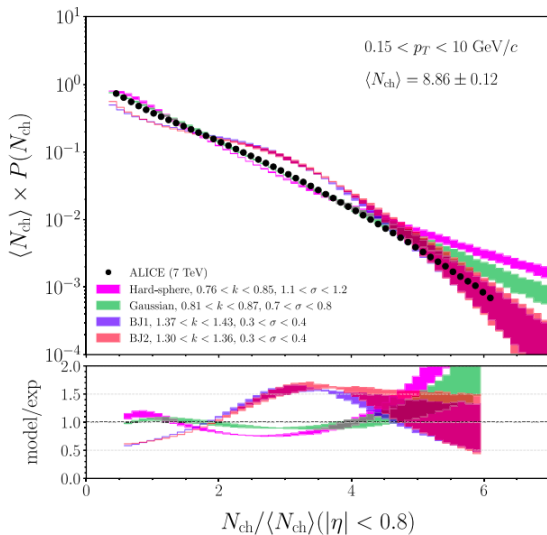
## Resultados (pp)

R. Terra, A. V. Giannini and F. S. Navarra Phys. Rev. D **113**, 094009 (2026)

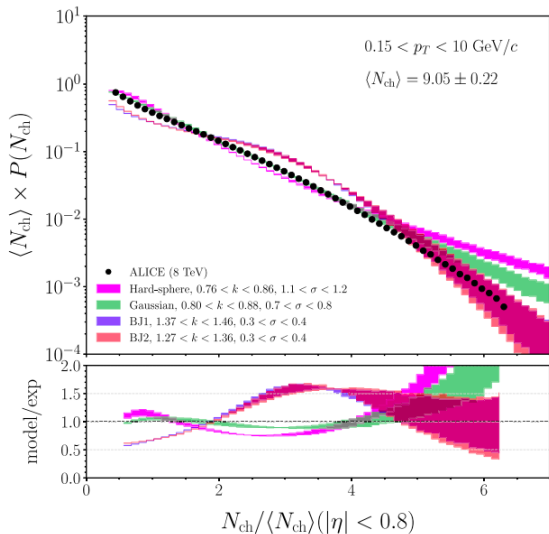
## Resultados (pp)

R. Terra, A. V. Giannini and F. S. Navarra Phys. Rev. D **113**, 094009 (2026)

## Resultados (pp)

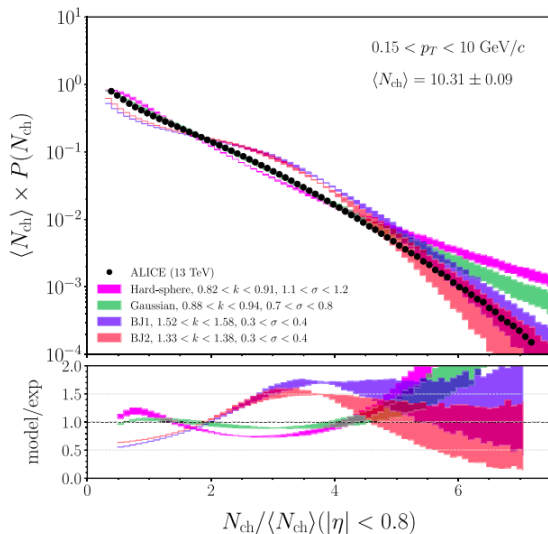
R. Terra, A. V. Giannini and F. S. Navarra Phys. Rev. D **113**, 094009 (2026)

## Resultados (pp)

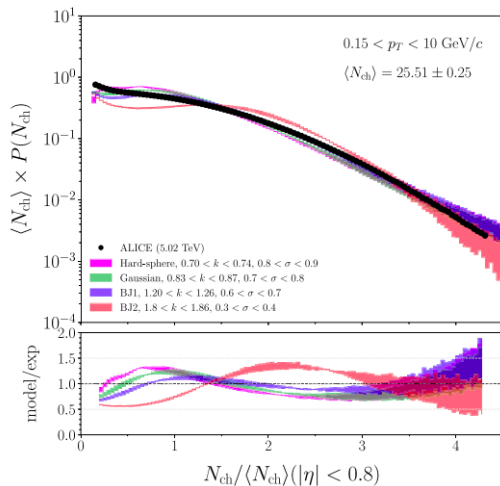
R. Terra, A. V. Giannini and F. S. Navarra Phys. Rev. D **113**, 094009 (2026)

# Resultados (pp)

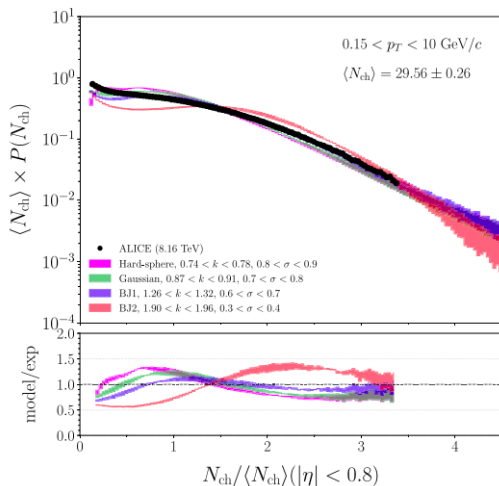
R. Terra, A. V. Giannini and F. S. Navarra Phys. Rev. D **113**, 094009 (2026)



## Resultados (pPb)

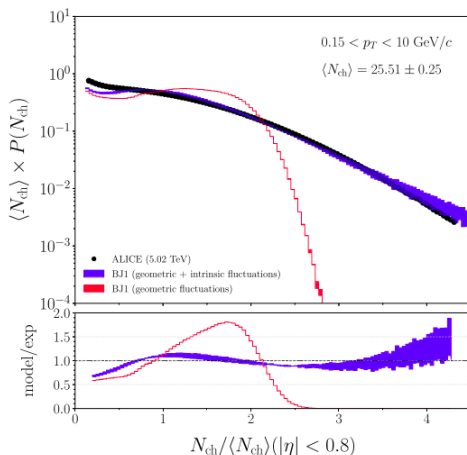
R. Terra, A. V. Giannini and F. S. Navarra Phys. Rev. D **113**, 094009 (2026)

## Resultados (pPb)

R. Terra, A. V. Giannini and F. S. Navarra Phys. Rev. D **113**, 094009 (2026)

# Flutuações intrínsecas são importantes?

R. Terra, A. V. Giannini and F. S. Navarra Phys. Rev. D **113**, 094009 (2026)



São essenciais!

# Conclusões

- Implementamos a junção bariônica no MCKT;
- Utilizamos a fatorização- $k_T$  para contabilizarmos a produção de gluons, mesons D e partículas carregadas;
- Conseguimos descrever os yields relativos de mesons D, mas não pudemos utilizar esses dados para fixar a estrutura do próton por conta das grandes incertezas experimentais;
- As condições iniciais gaussianas descrevem melhor  $p(N)$  em pp em baixas energias e em mais altas até  $4 \times \langle N \rangle$ , onde começam a superestimar os dados experimentais;
- As condições iniciais de junção bariônica descrevem melhor  $p(N)$  em pp na região de altas multiplicidades, em energias mais altas;
- A junção bariônica analítica foi a condição inicial que melhor descreveu as  $p(N)$  em pPb ;

# Obrigado!



