

# Produzione di (anti)nuclei leggeri con l'esperimento ALICE a LHC

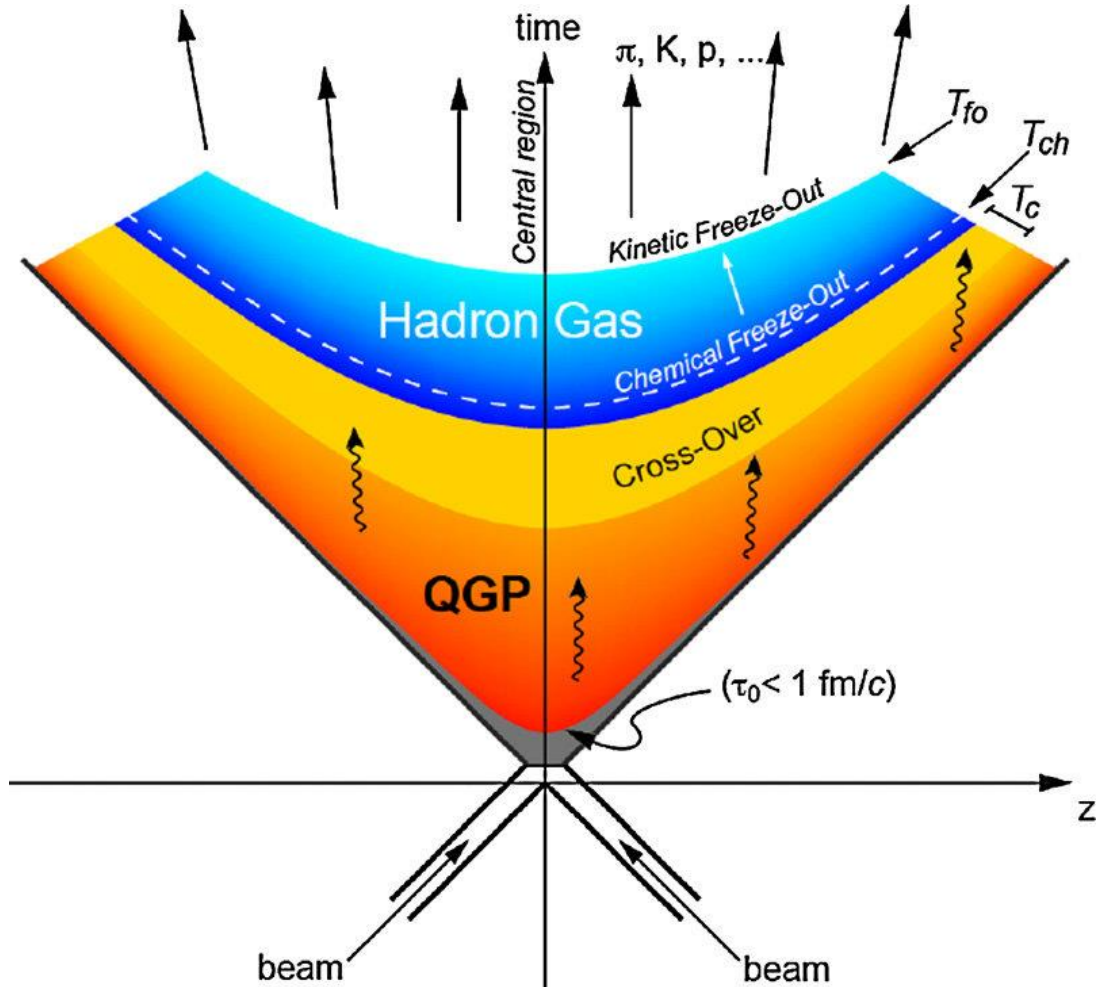
Marika Rasà\*

Per la Collaborazione ALICE

\*Università ed INFN Catania



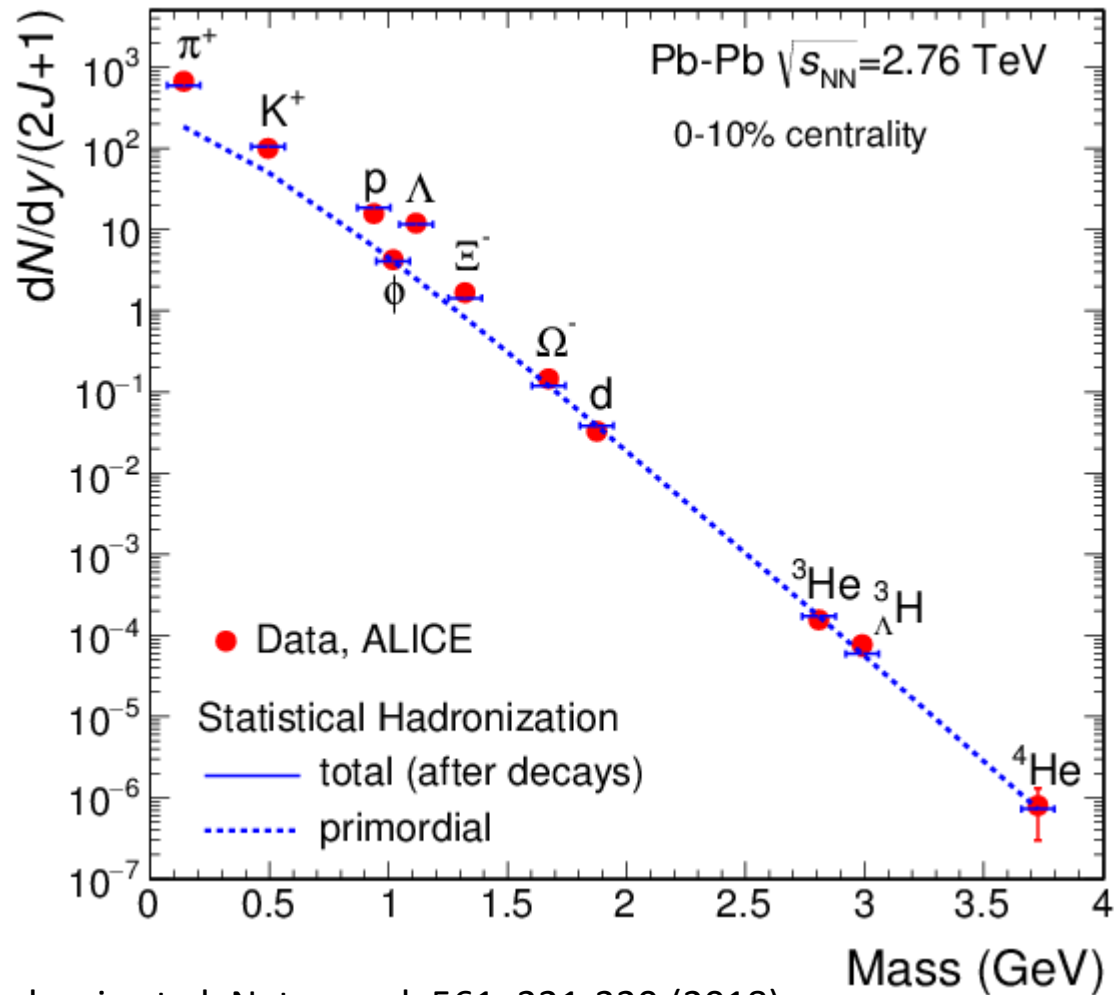
# Perché studiare gli (anti)nuclei leggeri?



- Gli (anti)nuclei leggeri sono prodotti nelle collisioni adroniche ad alta energia a LHC
- Il loro meccanismo di produzione non è ancora compreso
- Due modelli fenomenologici:
  - Modello termico statistico (SHM)
  - Modello di coalescenza



# Modello termico statistico (SHM)

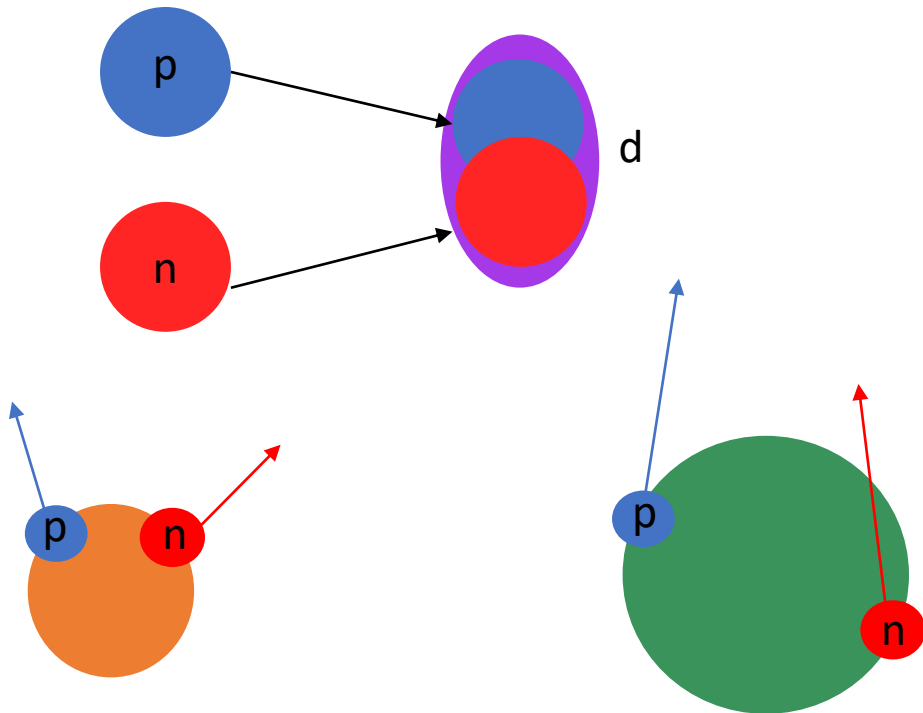


Andronic et al, Nature vol. 561, 321-330 (2018)

- Gli adroni sono emessi da un sistema in equilibrio termico e chimico
- Parametro chiave  $T_{\text{chem}}$
- $dN/dy \propto \exp(-m/T_{\text{chem}}) \rightarrow$  i nuclei, essendo pesanti, hanno una elevata sensibilità a  $T_{\text{chem}}$
- Energia di legame dei nuclei  $\sim$  MeV: come possono sopravvivere in un ambiente così caldo?
- Frequenza di produzione di particelle ben descritta da una temperatura comune di  $\sim 156$  MeV

# Modello di coalescenza

S. T. Butler et al., Phys. Rev. 129 (1963) 836



Dimensione sorgente  
piccola → Grande  $B_A$

$pp \sim 1 \text{ fm}$

$p\text{-Pb} \sim 1.5 \text{ fm}$

Dimensione sorgente  
grande → Piccolo  $B_A$

$\text{Pb-Pb} \sim 3\text{-}6 \text{ fm}$

- Se gli (anti)nucleoni sono vicini nello spazio delle fasi e soddisfano i requisiti di spin, possono legarsi e formare un (anti)nucleo
- Il parametro di coalescenza  $B_A$  è il parametro chiave del modello:

$$E_A \frac{d^3 N_A}{dp_A^3} = B_A \cdot \left( E_p \frac{d^3 N_p}{dp_p^3} \right)^A \quad p_p = p_A/A$$

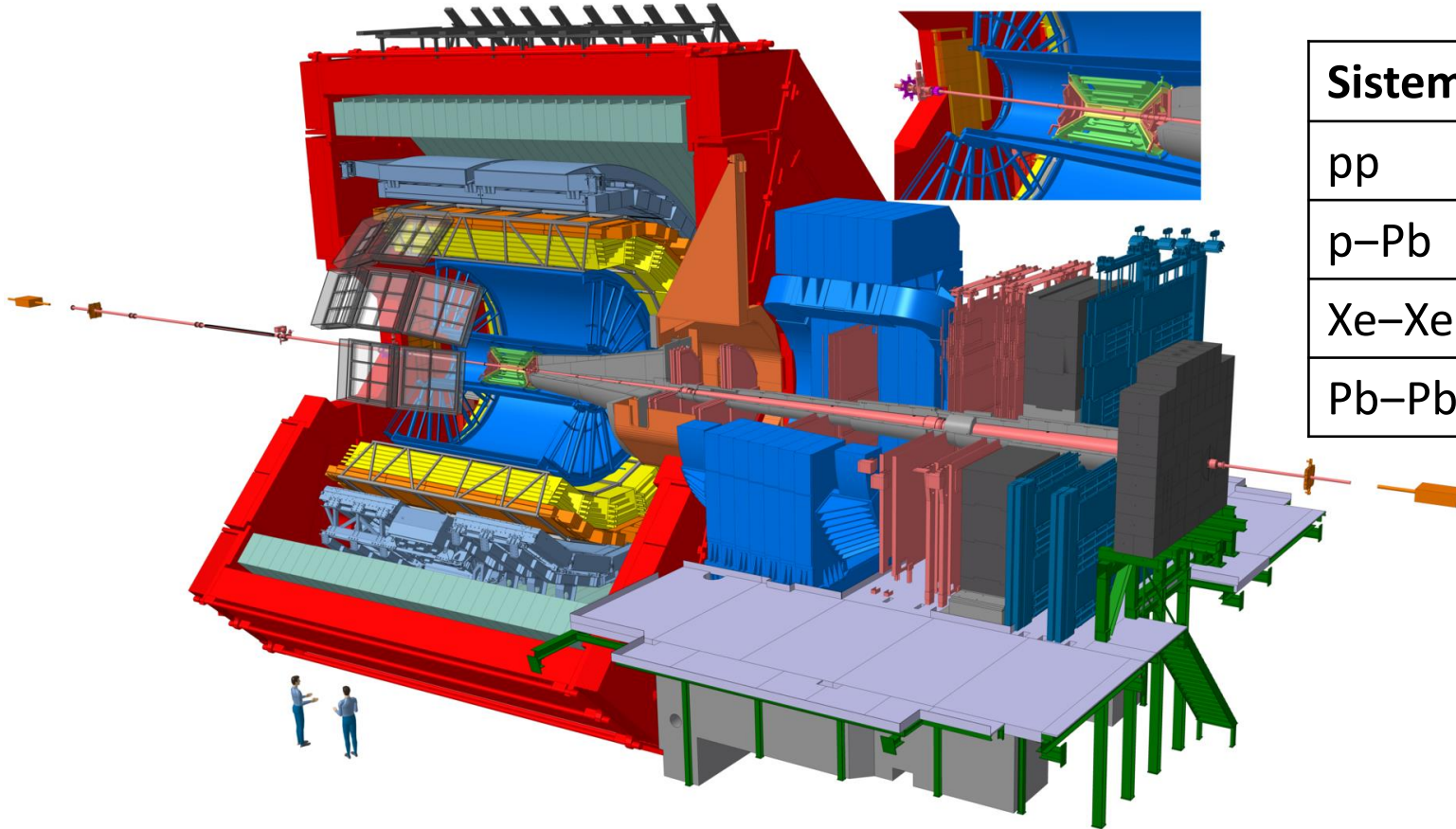
Resa invariante  
del nucleo

Parametro di  
coalescenza

Resa invariante  
dei protoni

- Il parametro di coalescenza dipende sia dalla dimensione della sorgente sia dall'estensione radiale della funzione d'onda del nucleo

# L'esperimento ALICE a LHC in Run 1&2



Sistema di collisione	$\sqrt{s_{NN}}$ (TeV)
pp	0.9, 2.76, 5.02, 7, 8, 13
p-Pb	5.02, 8.16
Xe-Xe	5.44
Pb-Pb	2.76, 5.02

- Miglior esperimento ad LHC per lo studio degli (anti)nuclei
- Ottime capacità di identificazione delle particelle

*JINST* 3 (2008) S08002

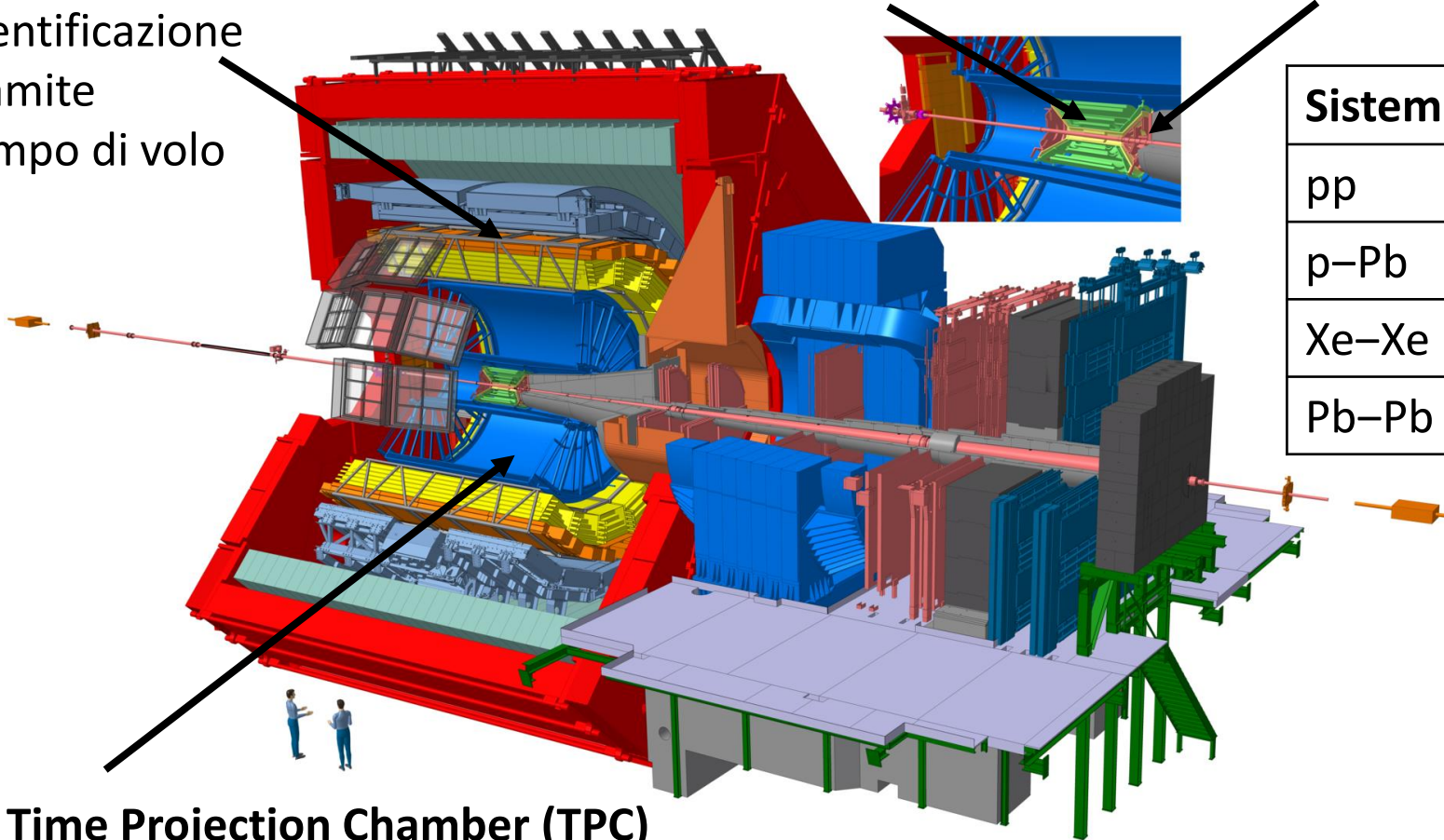
Int. J. Mod. Phys. A 29 (2014) 1430044

# L'esperienza ALICE a LHC in Run 1&2

**Time Of Flight (TOF)** Identificazione tramite tempo di volo

**Inner Tracking System (ITS)** Tracciamento, vertice, identificazione

**V0** Trigger, molteplicità



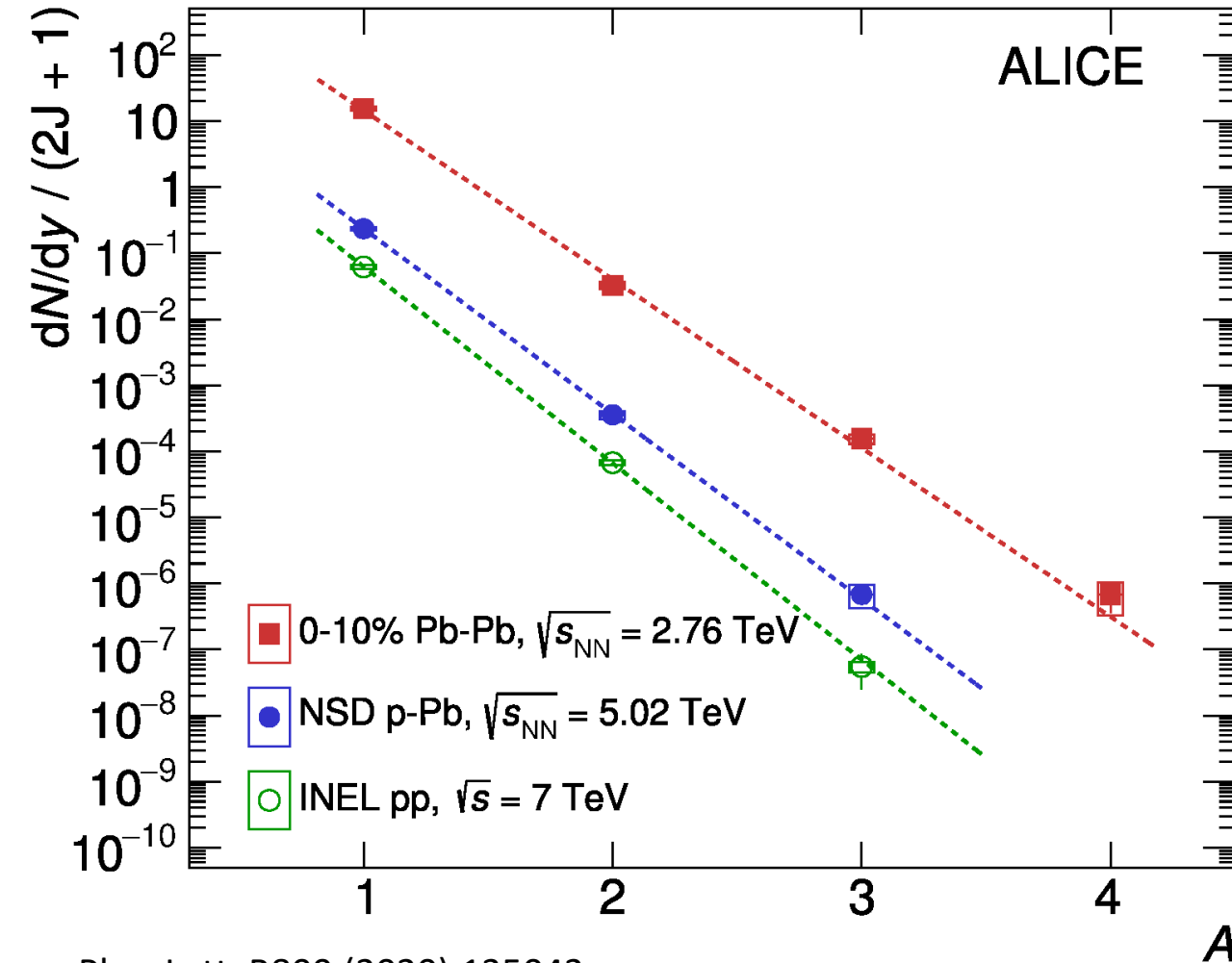
Sistema di collisione	$\sqrt{s_{NN}}$ (TeV)
pp	0.9, 2.76, 5.02, 7, 8, 13
p-Pb	5.02, 8.16
Xe-Xe	5.44
Pb-Pb	2.76, 5.02

- Miglior esperimento ad LHC per lo studio degli (anti)nuclei
- Ottime capacità di identificazione delle particelle

**Time Projection Chamber (TPC)** Tracciamento, identificazione tramite  $dE/dx$

*JINST* 3 (2008) S08002  
*Int. J. Mod. Phys. A* 29 (2014) 1430044

# Frequenza di produzione di particelle

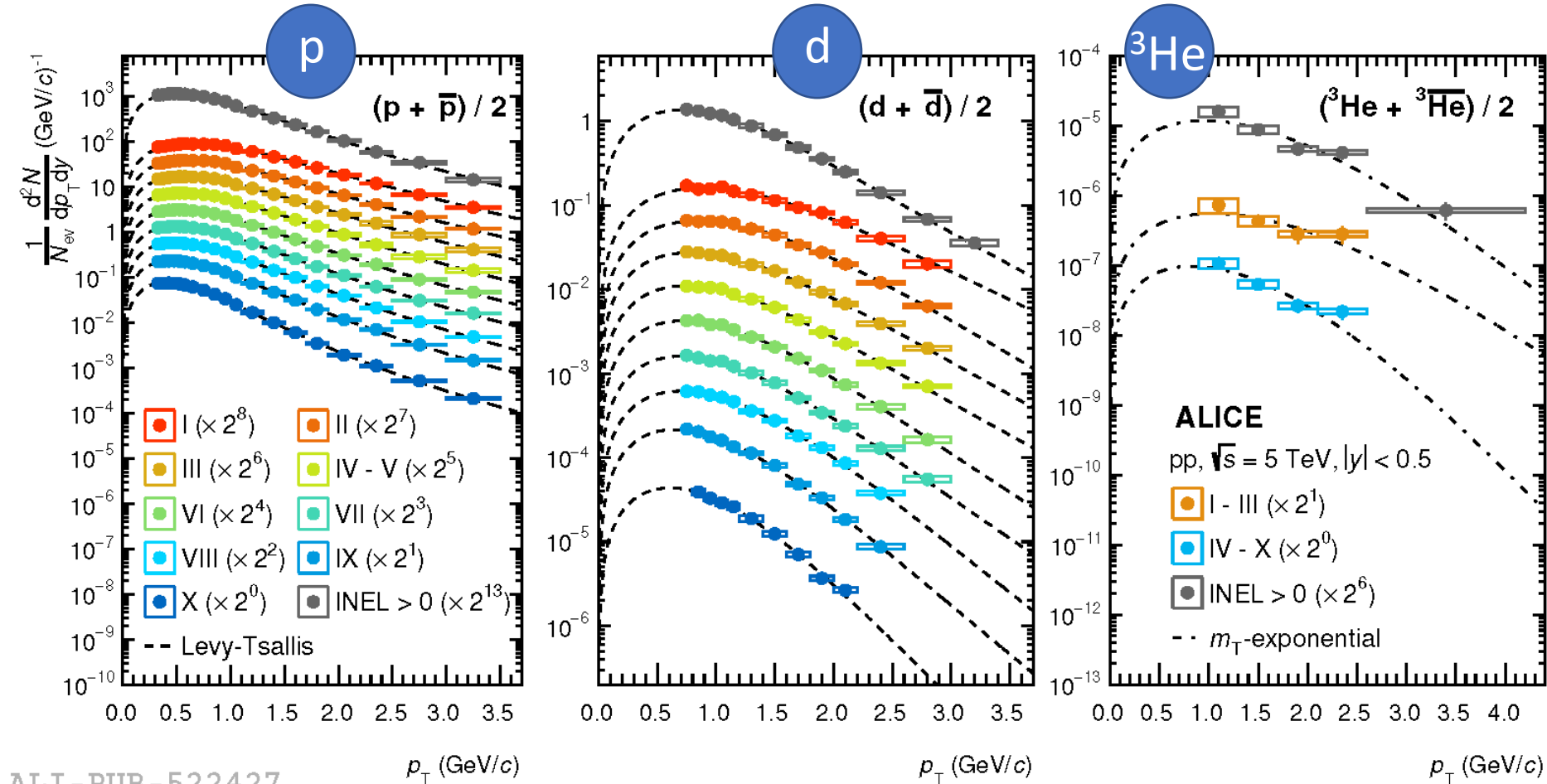


Phys.Lett. B800 (2020) 135043

- La produzione di (anti)nuclei è un processo raro
- Maggiore produzione in collisioni tra ioni pesanti
- Frequenza di produzione di particelle decresce esponenzialmente in funzione del numero di massa del nucleo
- Penalty factor:
  - $942 \pm 107$  in INEL pp,  $\sqrt{s} = 7$  TeV
  - $635 \pm 90$  in NSD p-Pb,  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  TeV
  - $359 \pm 41$  in 0-10% Pb-Pb,  $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$  TeV



# (Anti)nuclei leggeri in pp



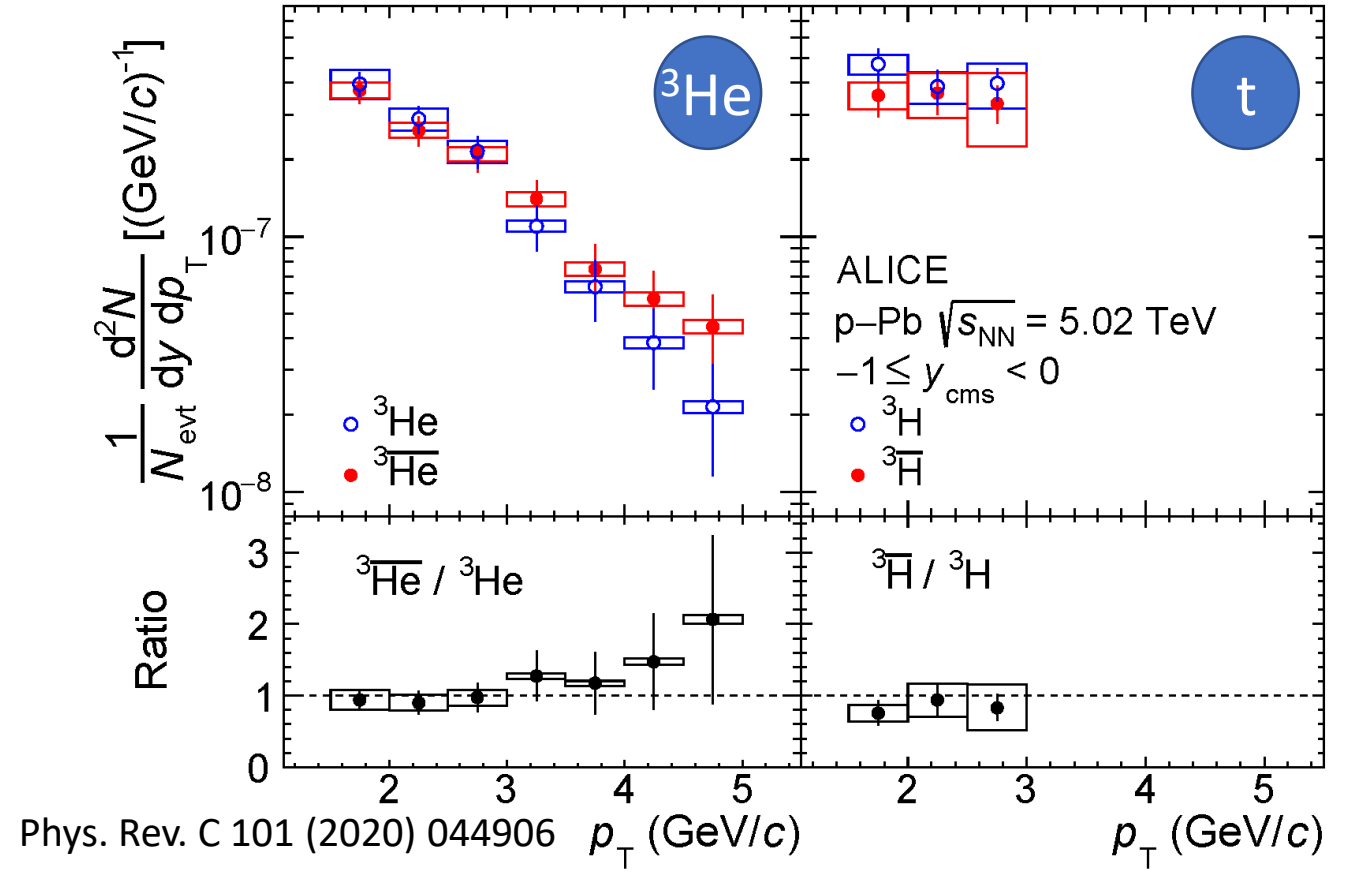
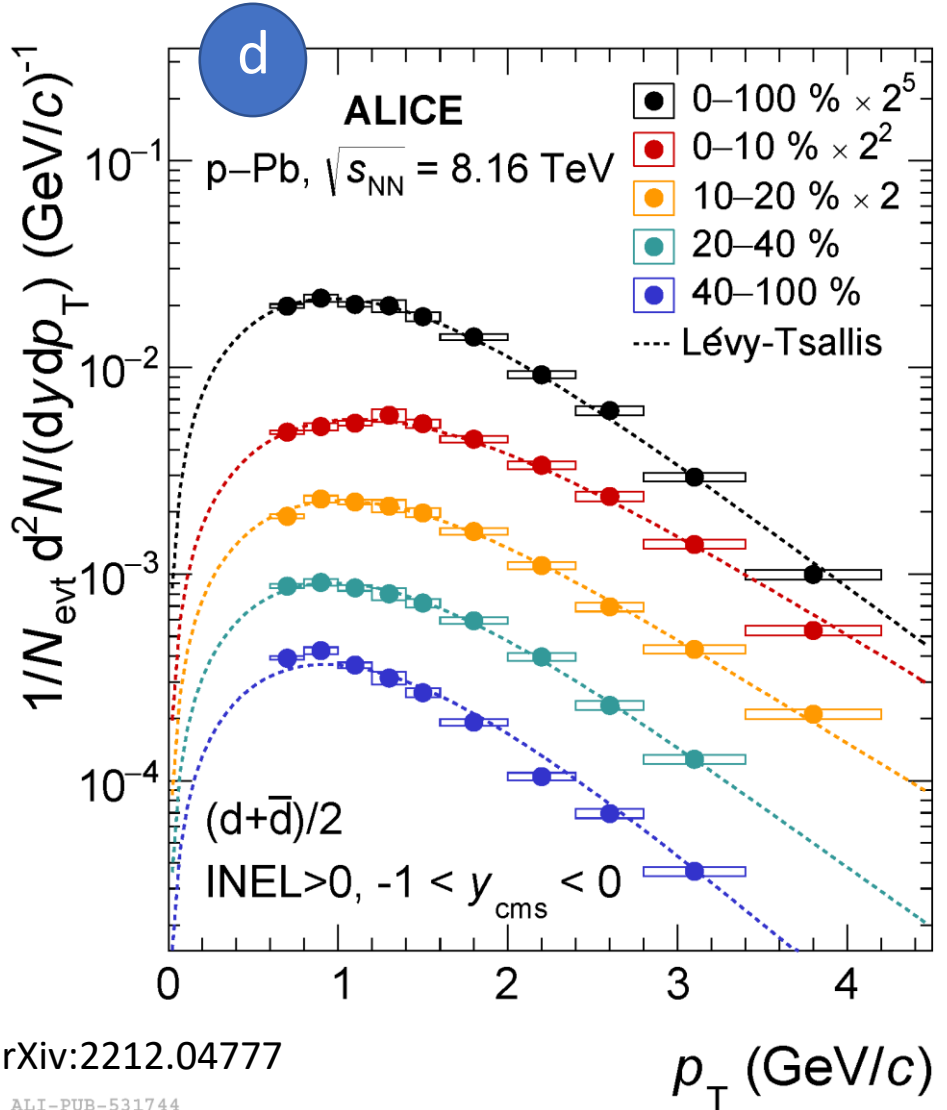
- Produzione studiata a diverse energie e classi di molteplicità
- Studiati nuclei fino ad (anti) $^3\text{He}$
- Spettri in impulso trasverso fittati con Lévy-Tsallis o  $m_T$ -exponential per estrapolare il segnale a basso e alto  $p_T$
- Hardening degli spettri in funzione della molteplicità

Eur. Phys. J. C 82, 289 (2022)





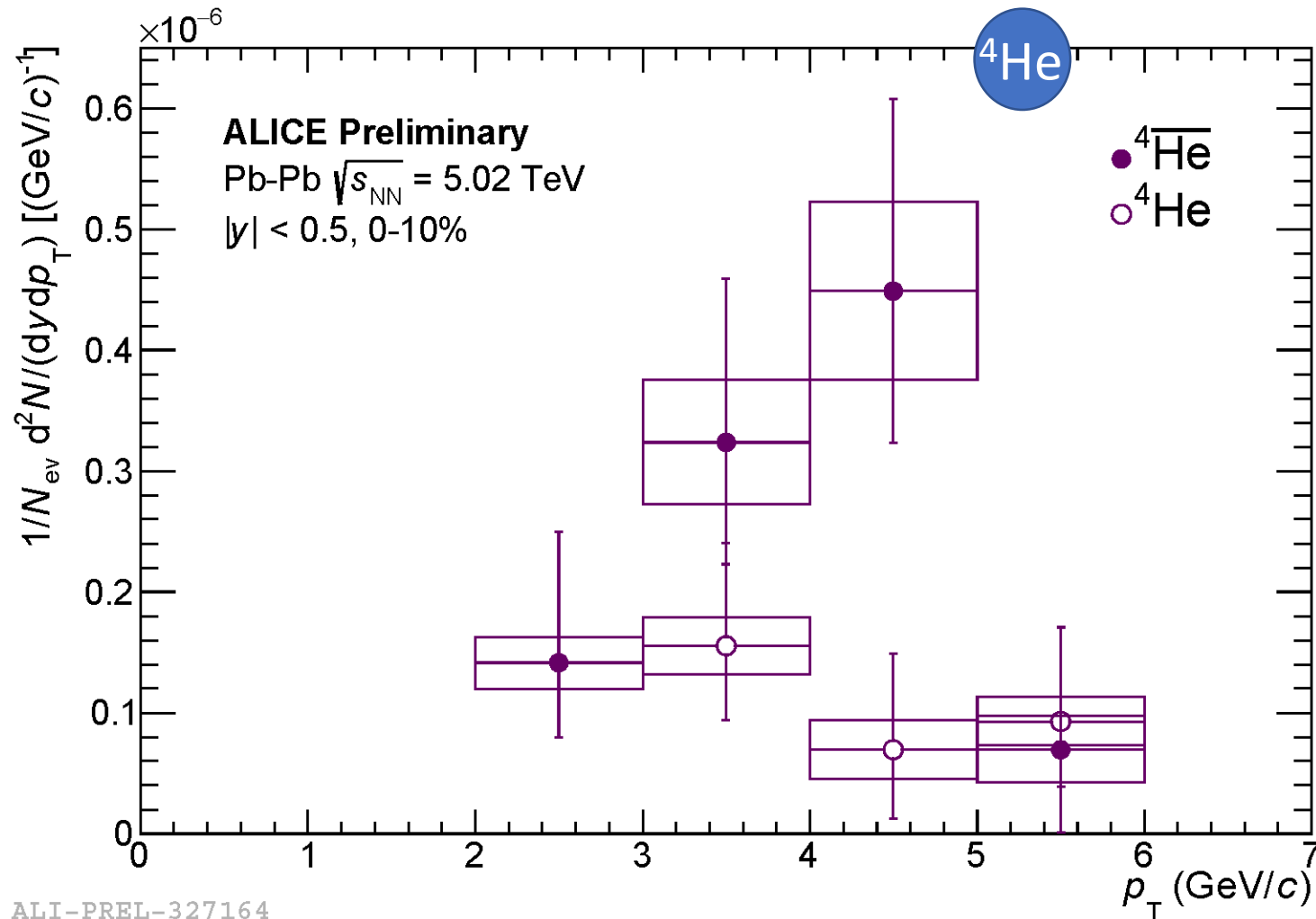
# (Anti)nuclei leggeri in p-Pb



- Produzione studiata a diverse energie e classi di molteplicità
- Studiati nuclei fino ad (anti) ${}^3\text{He}$

arXiv:2212.04777  
ALI-PUB-531744

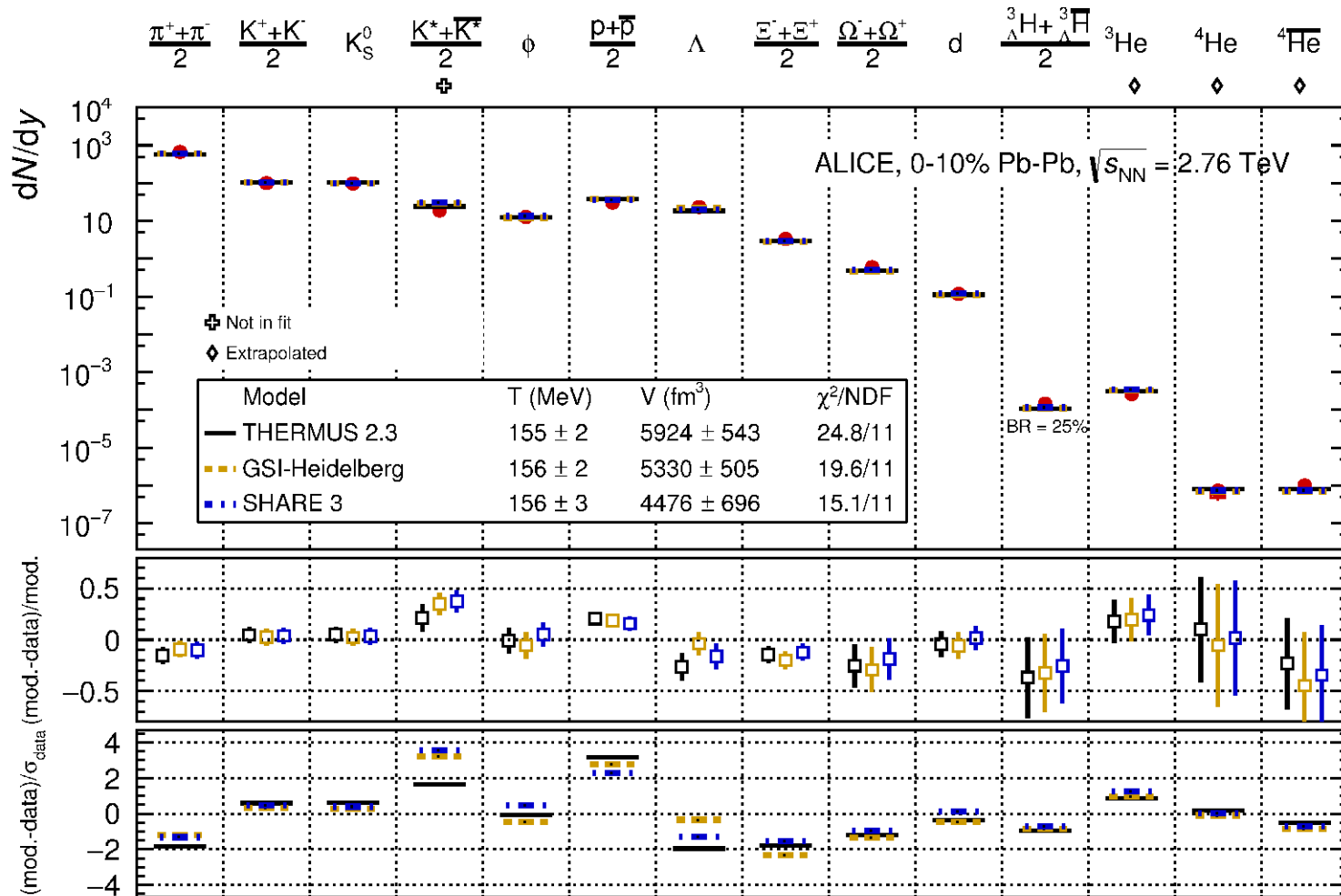
# (Anti)nuclei leggeri in Pb-Pb



ALI-PREL-327164

- Grazie all'elevata statistica, osservati (anti) ${}^4\text{He}$
- Primi risultati sullo spettro di impulso trasverso per (anti) ${}^4\text{He}$
- Nuclei più leggeri studiati a diverse energie e classi di molteplicità

# Confronto con i modelli – SHM

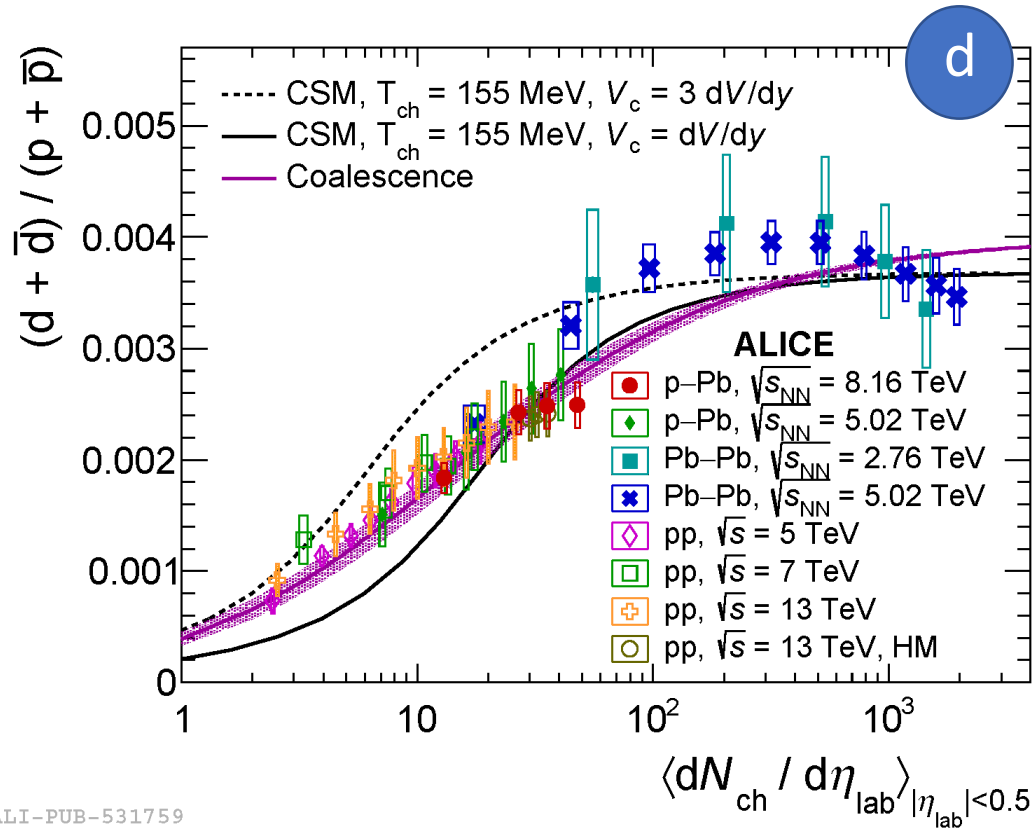


- Confronto tra resa misurata e resa prevista da diverse implementazioni del modello termico statistico
- Fit ottenuto considerando tutte le particelle leggere misurate da ALICE
- Resa in accordo con una temperatura comune di circa 155 MeV

Nucl. Phys. A971(2018) 1-20

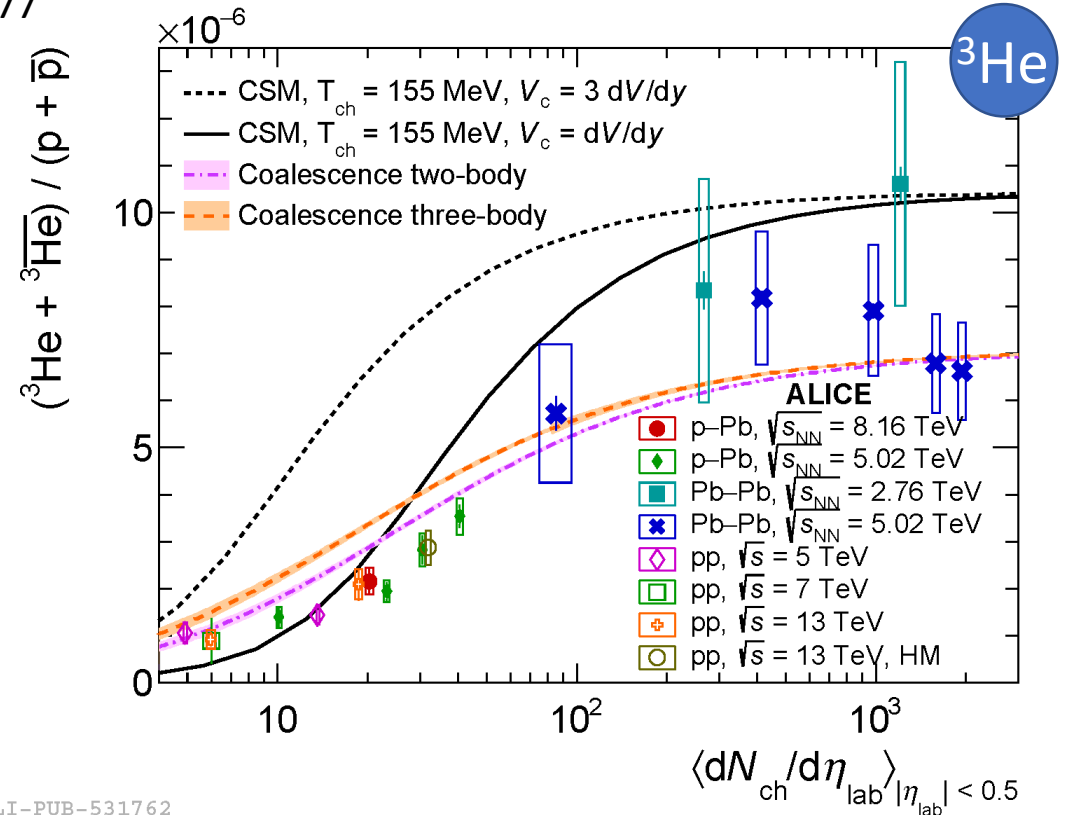
THERMUS 4: Comput.Phys.Commun. 180 (2009) 84-106  
 GSI-Heidelberg: Phys.Lett. B 673 (2009) 142  
 SHARE 3: Comput.Phys.Commun. 167 (2005) 229-251

# Confronto con i modelli – rapporto con i protoni



ALI-PUB-531759

arXiv:2212.04777



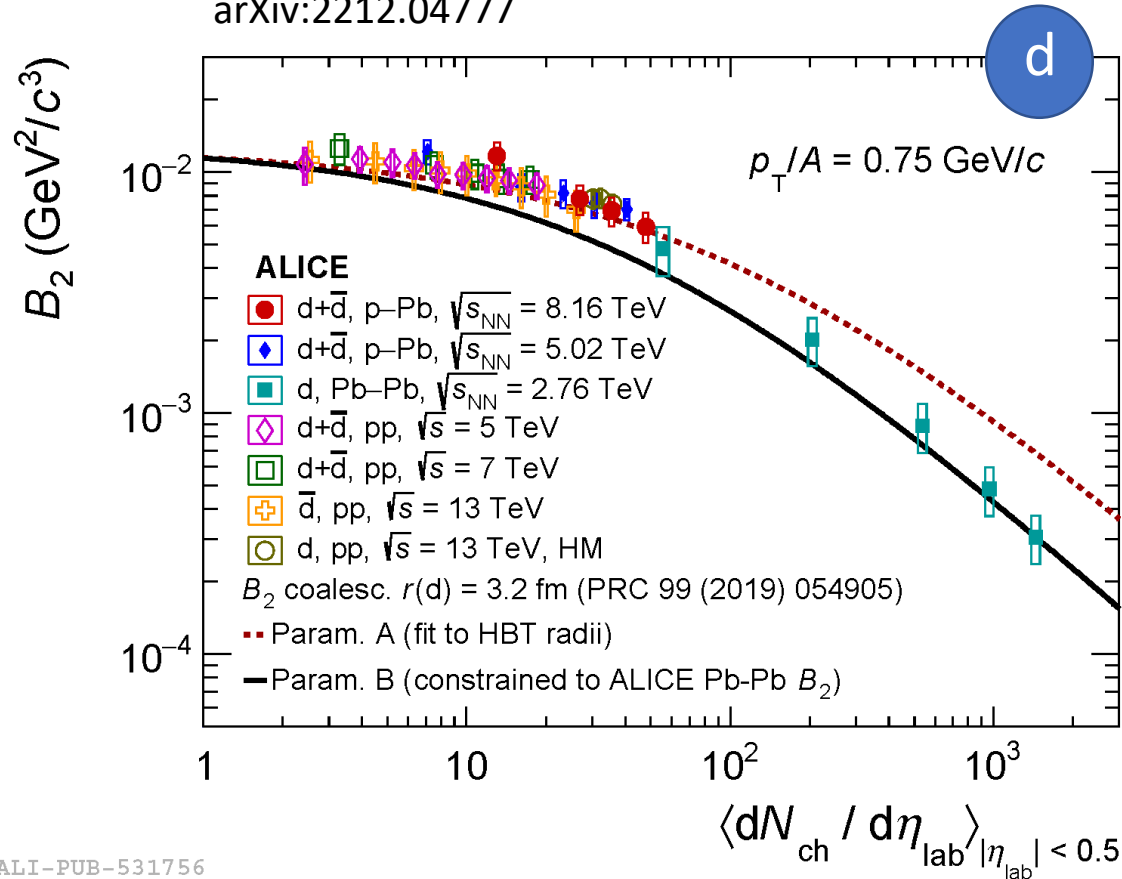
ALI-PUB-531762

- Rapporto con i protoni in funzione della molteplicità cresce al variare di energia e sistema di riferimento
- Saturazione del rapporto tra rese a molteplicità corrispondenti a collisioni Pb-Pb
- Confronto con predizioni derivanti da Thermal-FIST CSM e modello di coalescenza
- Trend dei dati riprodotto qualitativamente

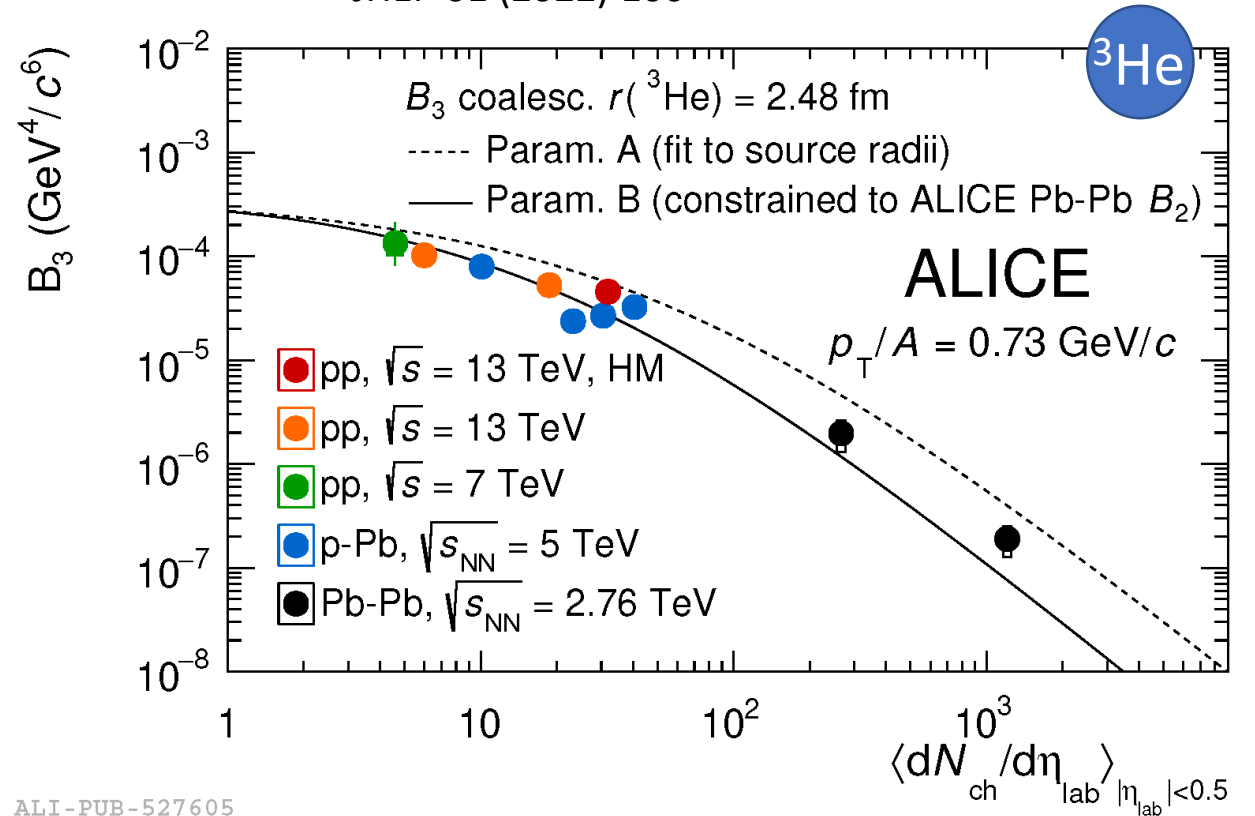


# Confronto con i modelli – coalescenza

arXiv:2212.04777



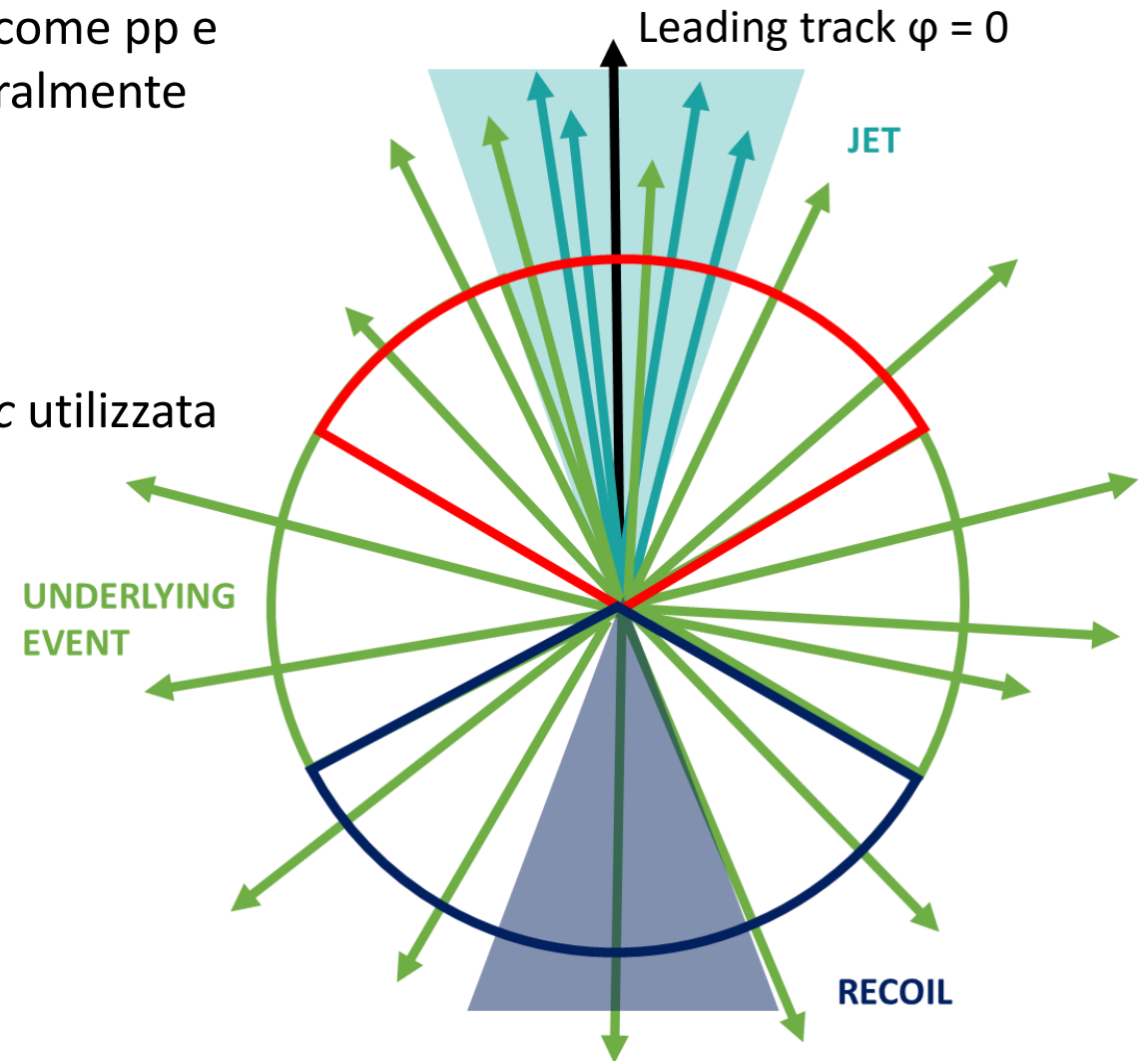
JHEP 01 (2022) 106



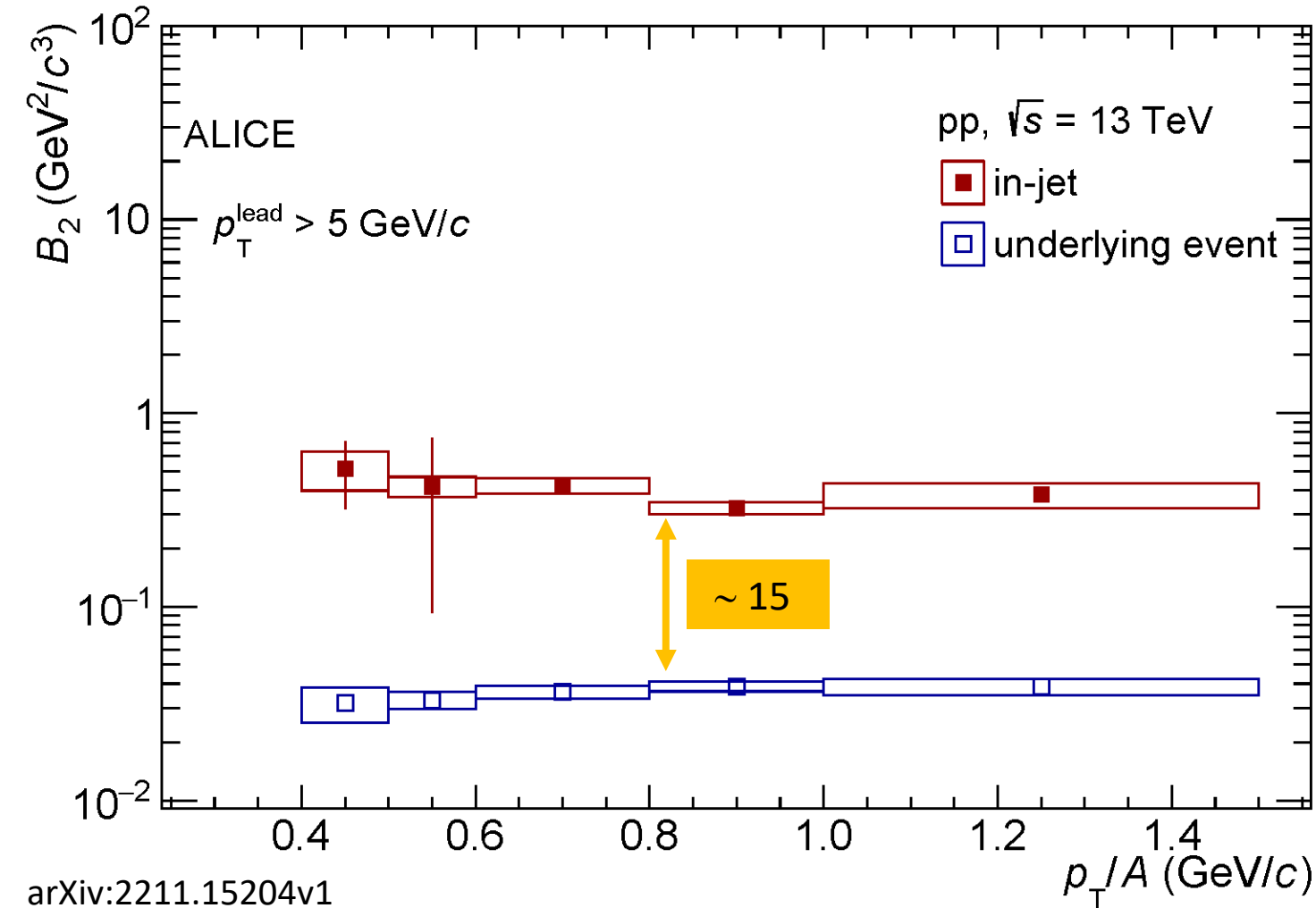
- Parametro di coalescenza decresce all'aumentare della dimensione della sorgente
- Due differenti parametrizzazioni della dimensione della sorgente in funzione di  $dN_{ch}/d\eta$
- Trend dei dati riprodotto qualitativamente

# (Anti)deuterio in jet

- Lo studio del parametro di coalescenza in sistemi piccoli, come pp e p–Pb, è molto interessante dato che i nucleoni sono naturalmente più vicini nello spazio delle fasi rispetto al caso Pb–Pb
- Studio in jet e in underlying event
- “Leading particle”: particella con  $p_T$  più alto e  $p_T > 5 \text{ GeV}/c$  utilizzata come riferimento per l’asse del jet
- Tre regioni azimutali individuate:
  - **Toward** ( $|\Delta\phi| < 60^\circ$ ): contiene jet e UE
  - **Transverse** ( $60^\circ < |\Delta\phi| < 120^\circ$ ): dominata da Underlying Event (UE)
  - **Away** ( $|\Delta\phi| > 120^\circ$ ): contiene recoil jet e UE
- **Jet: Toward – Transverse**

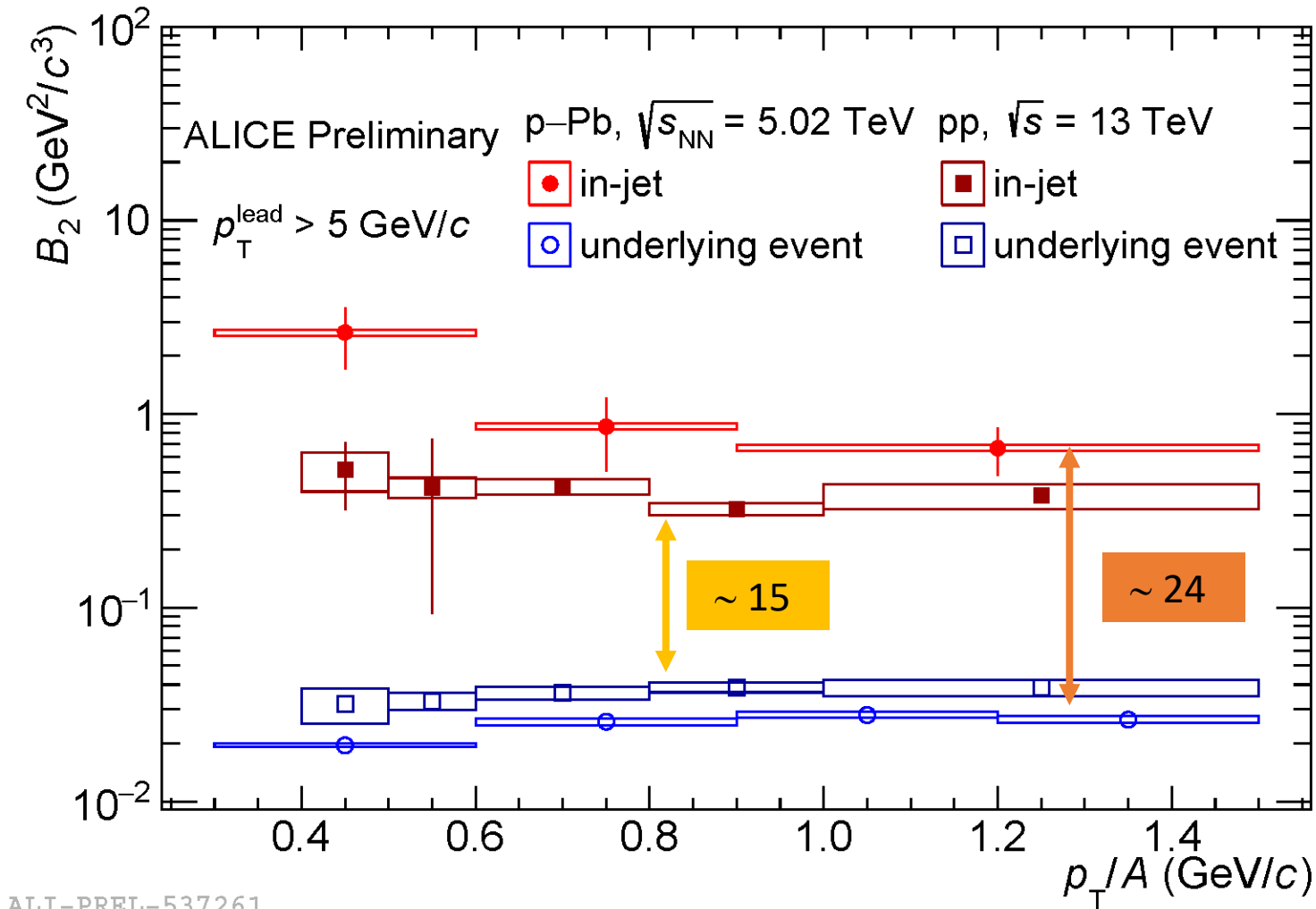


Martin, T., Skands, P. & Farrington, S. *Eur. Phys. J. C* **76**, 299 (2016)



- Valore maggiore di  $B_2^{\text{jet}}$  rispetto a  $B_2^{\text{UE}}$  in collisioni pp
- Cosa succede in collisioni p-Pb?

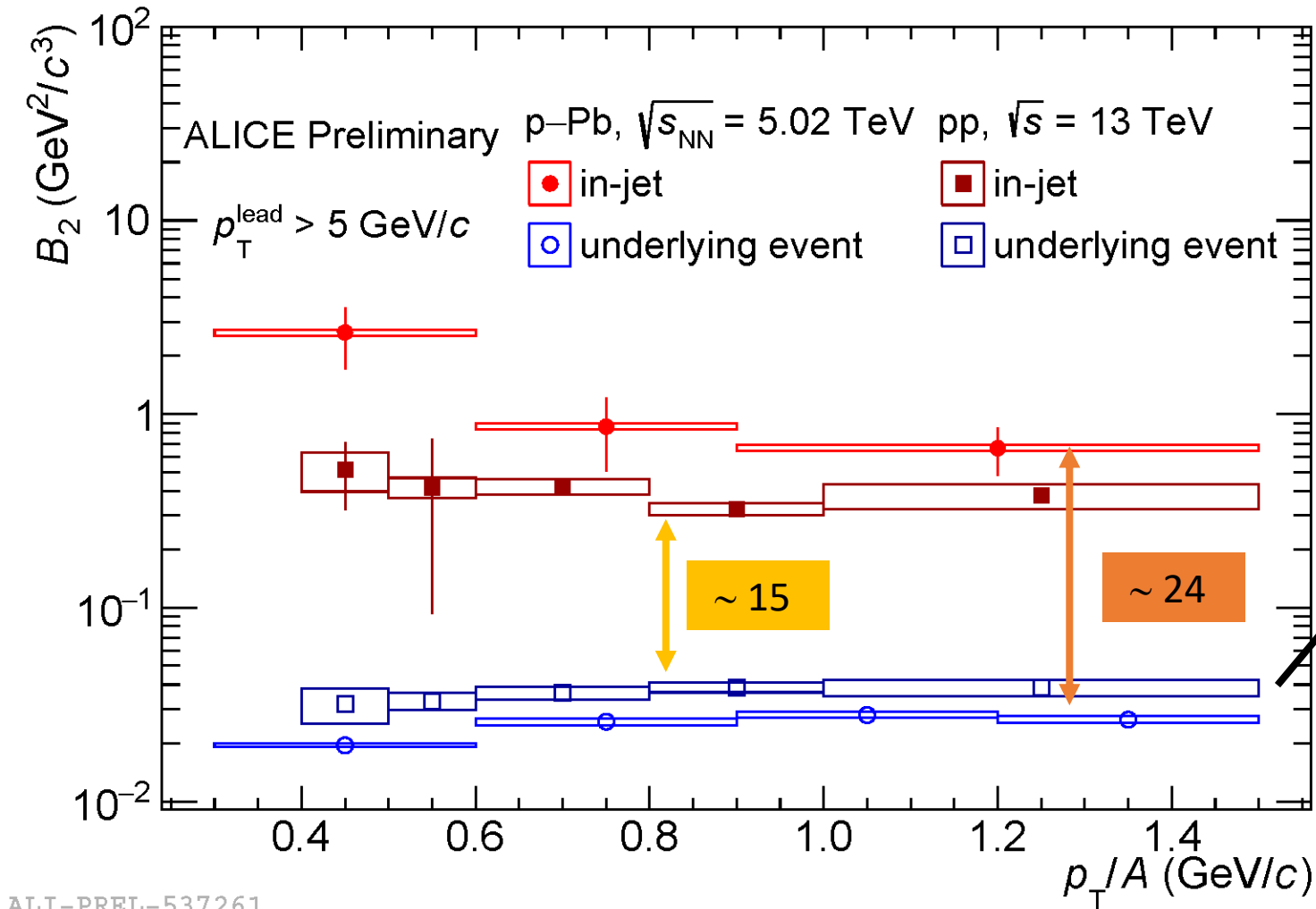
# $B_2$ in jet



- Valore maggiore di  $B_2^{\text{jet}}$  rispetto a  $B_2^{\text{UE}}$  in collisioni pp
- Cosa succede in collisioni p-Pb?
- Il fattore tra  $B_2^{\text{jet}}$  e  $B_2^{\text{UE}}$  è maggiore in collisioni p-Pb rispetto a collisioni pp

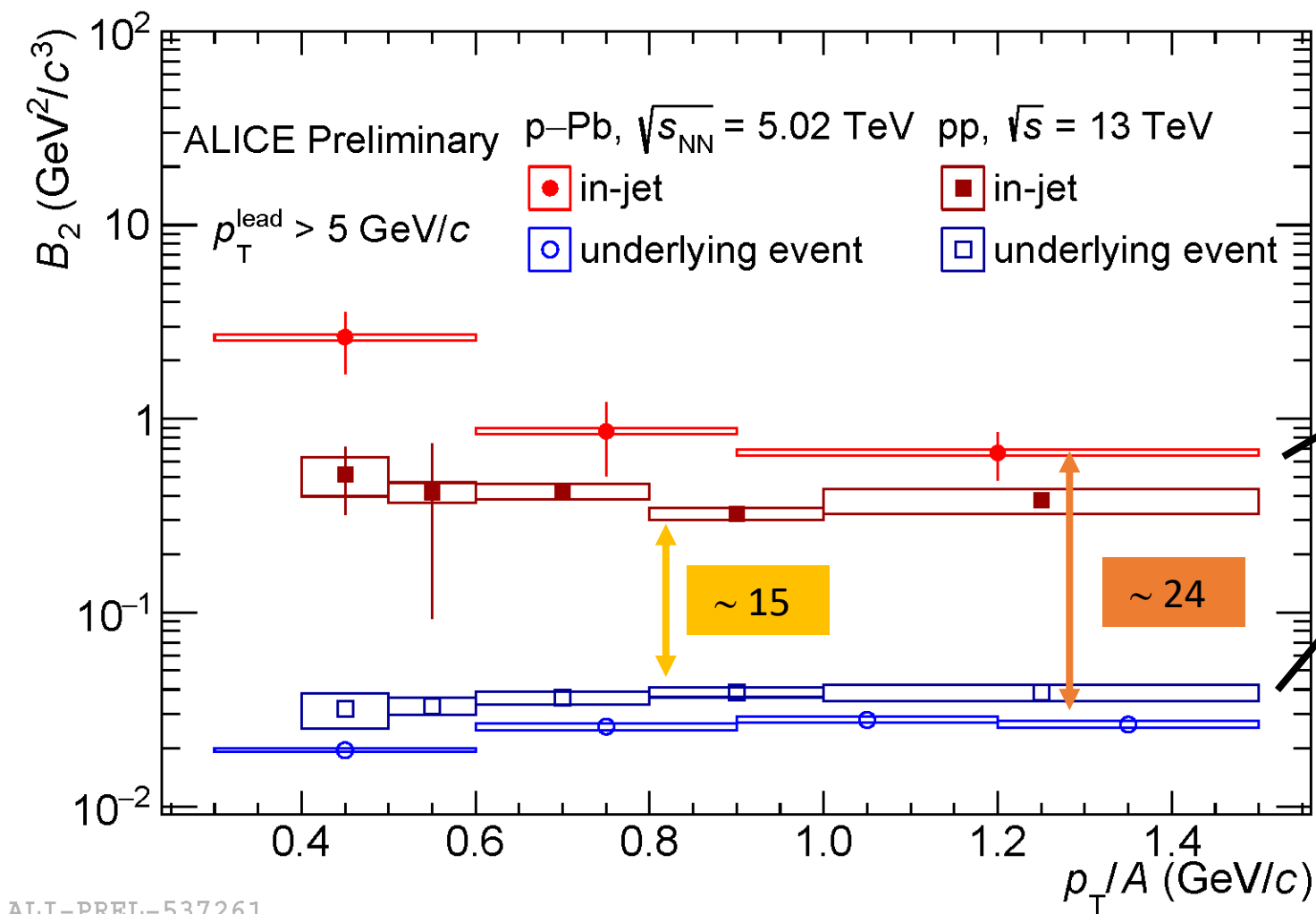


# $B_2$ in jet



- Valore maggiore di  $B_2^{\text{jet}}$  rispetto a  $B_2^{\text{UE}}$  in collisioni pp
- Cosa succede in collisioni p-Pb?
- Il fattore tra  $B_2^{\text{jet}}$  e  $B_2^{\text{UE}}$  è maggiore in collisioni p-Pb rispetto a collisioni pp

$B_2^{\text{UE}}(p\text{-Pb}) < B_2^{\text{UE}}(pp)$  dato che la dimensione della sorgente in p-Pb è maggiore rispetto a quella pp



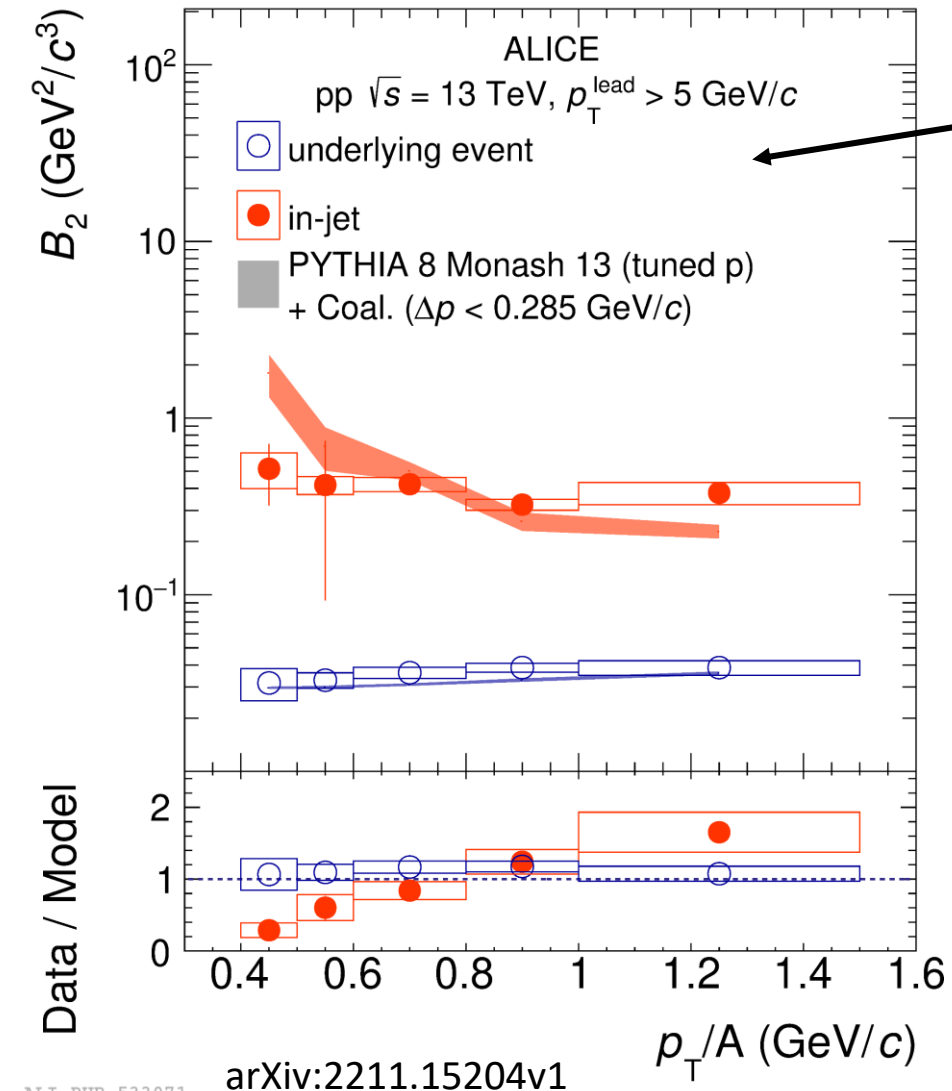
- Valore maggiore di  $B_2^{\text{jet}}$  rispetto a  $B_2^{\text{UE}}$  in collisioni pp
- Cosa succede in collisioni p-Pb?
- Il fattore tra  $B_2^{\text{jet}}$  e  $B_2^{\text{UE}}$  è maggiore in collisioni p-Pb rispetto a collisioni pp

$B_2^{\text{jet}}(p\text{-Pb}) > B_2^{\text{jet}}(pp)$

$B_2^{\text{UE}}(p\text{-Pb}) < B_2^{\text{UE}}(pp)$  dato che la dimensione della sorgente in p-Pb è maggiore rispetto a quella pp

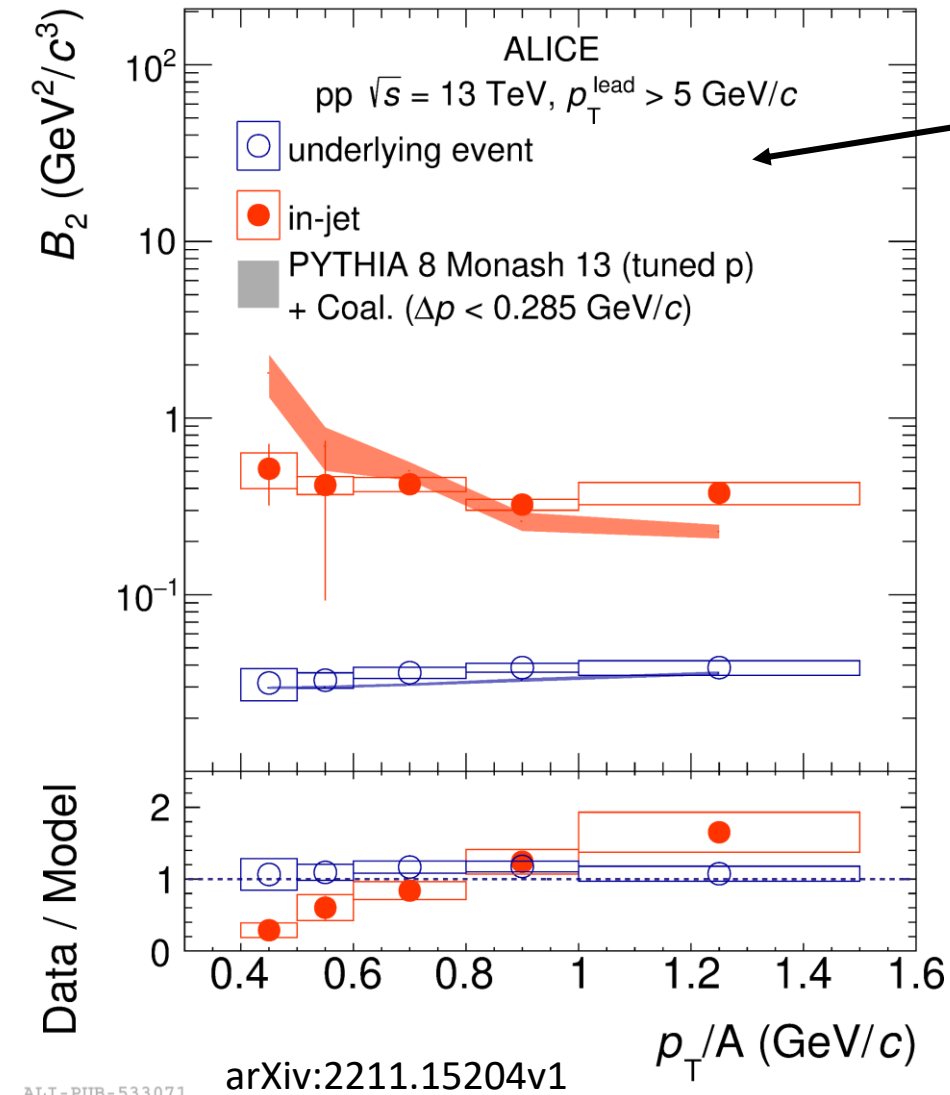
Assumendo la stessa dimensione della sorgente per i nucleoni nel jet, in p-Pb potrebbero esserci più nucleoni rispetto al caso pp → probabilmente più vicini nello spazio degli impulsi in p-Pb →  $B_2^{\text{jet}}$  maggiore in p-Pb

# $B_2$ in jet – confronto con i modelli

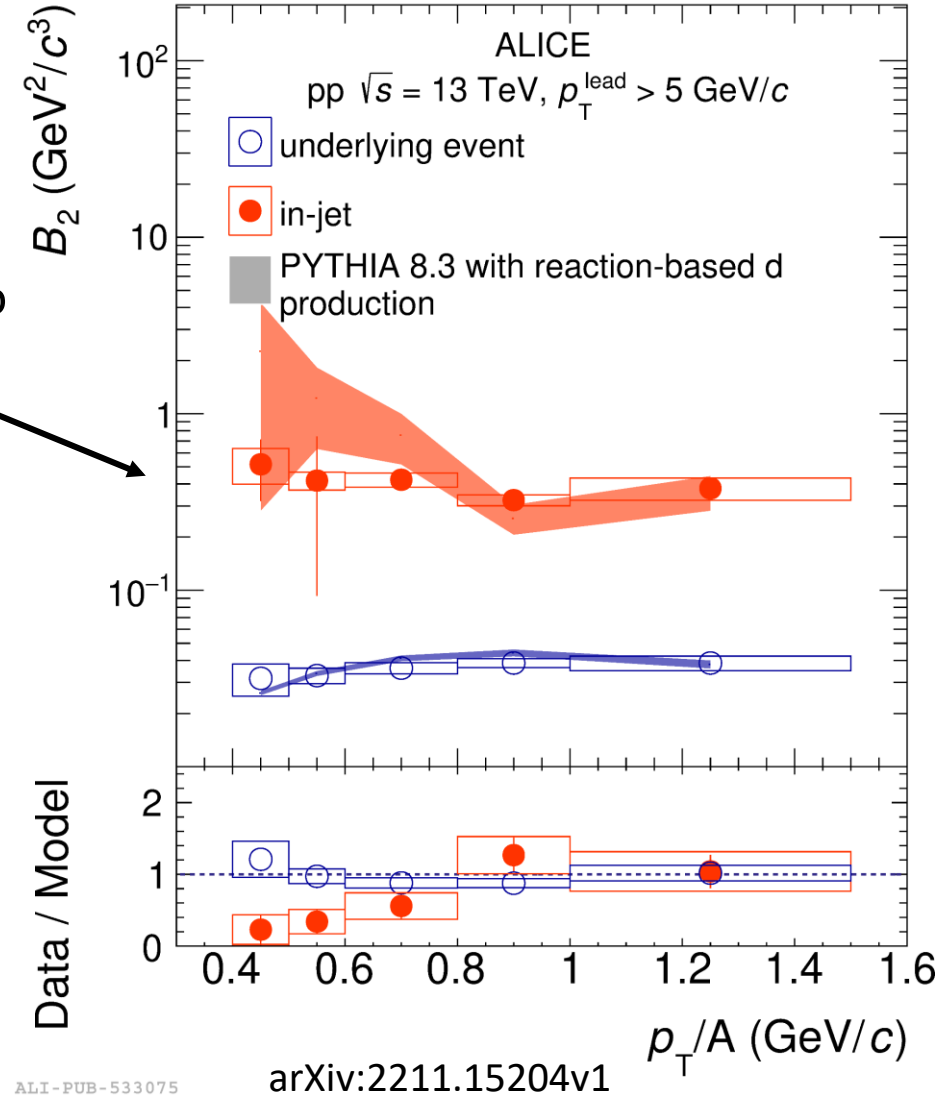


- Due modelli differenti:
- PYTHIA 8 Monash 13 + coalescenza semplice

# $B_2$ in jet – confronto con i modelli

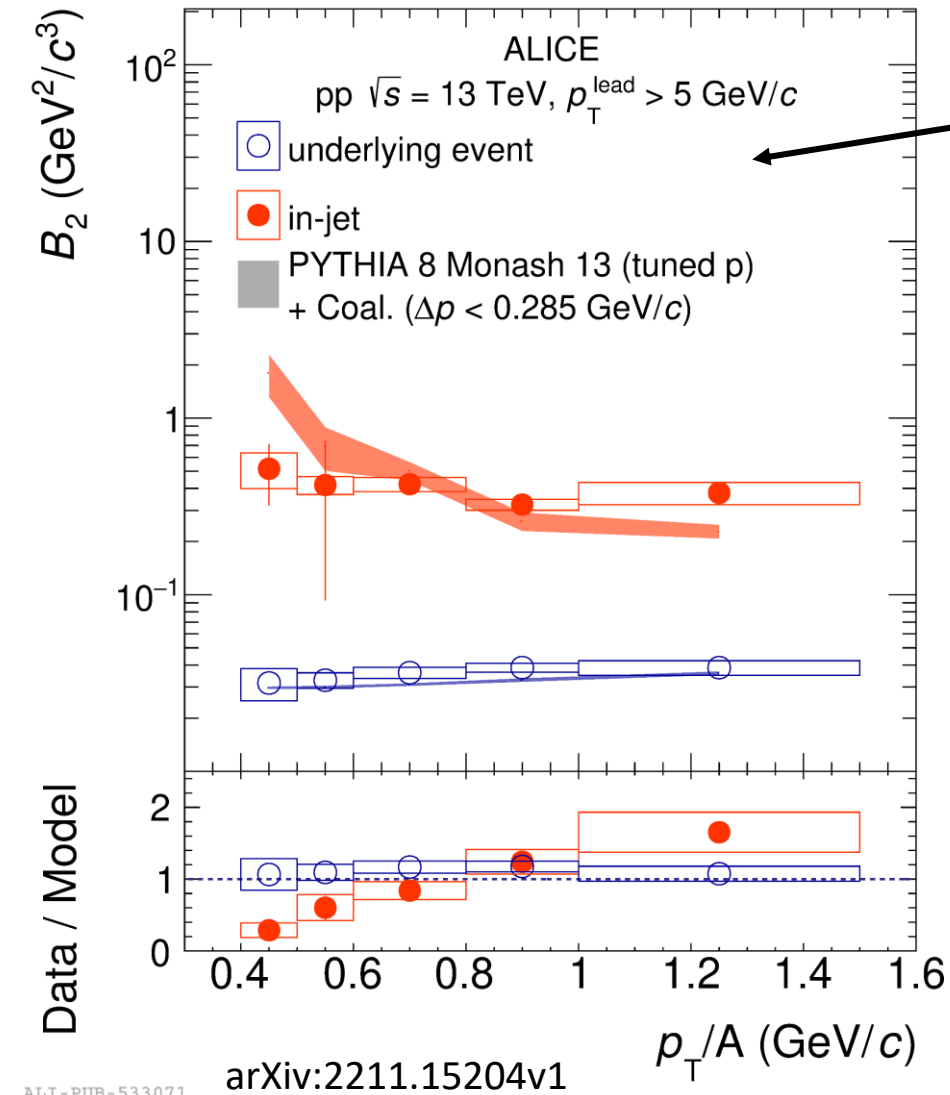


- Due modelli differenti:
  - PYTHIA 8 Monash 13 + coalescenza semplice
  - PYTHIA 8.3 con produzione di deuterio tramite reazioni (Bierlich et al., arXiv:2203.11601)



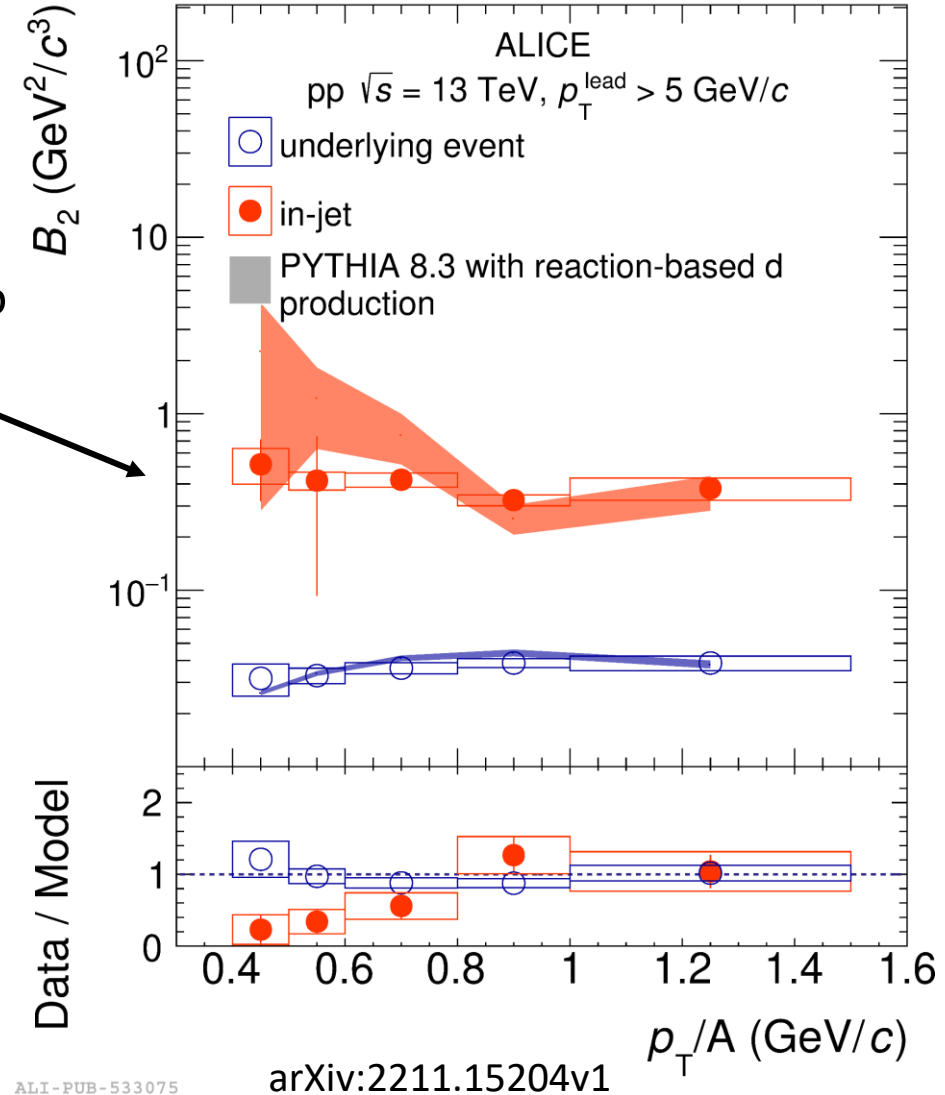


# $B_2$ in jet – confronto con i modelli



- Due modelli differenti:
  - PYTHIA 8 Monash 13 + coalescenza semplice
  - PYTHIA 8.3 con produzione di deuterio tramite reazioni (Bierlich et al., arXiv:2203.11601)

- Entrambi i modelli riproducono la grande differenza tra  $B_2^{\text{jet}}$  e  $B_2^{\text{UE}}$



- La produzione di (anti)nuclei leggeri è stata studiata a fondo dall'esperimento ALICE in diversi sistemi di collisione
- Di estremo interesse per lo studio del processo di adronizzazione
- Confronto con i modelli proposti: termico statistico e di coalescenza
- In entrambi i casi, i modelli riproducono qualitativamente i dati, ma sono presenti delle discrepanze
- Aumento di  $B_2^{\text{jet}}$  rispetto a  $B_2^{\text{UE}}$  di un fattore 15 (24) in collisioni pp (p-Pb)
- Nuovi studi in corso su dati di Run 3

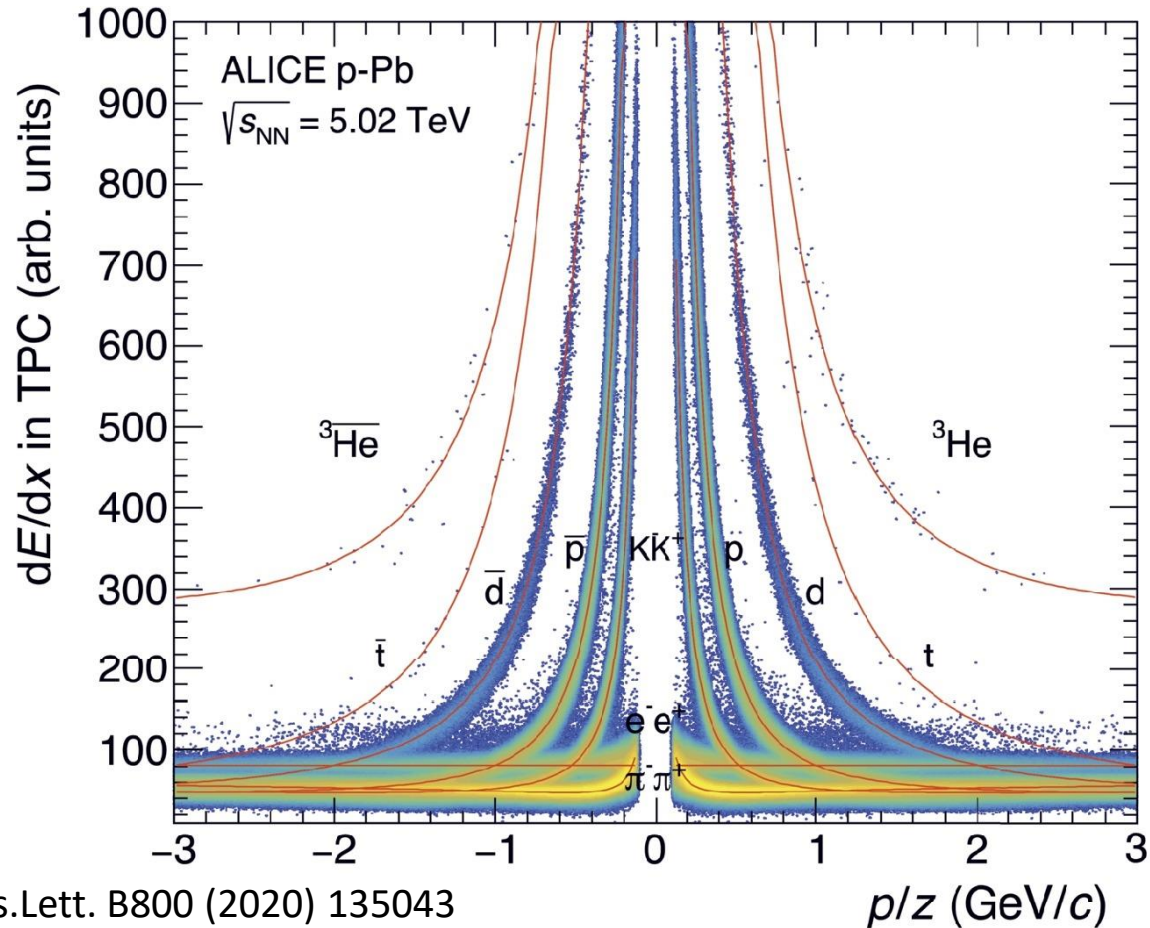
Grazie per l'attenzione!



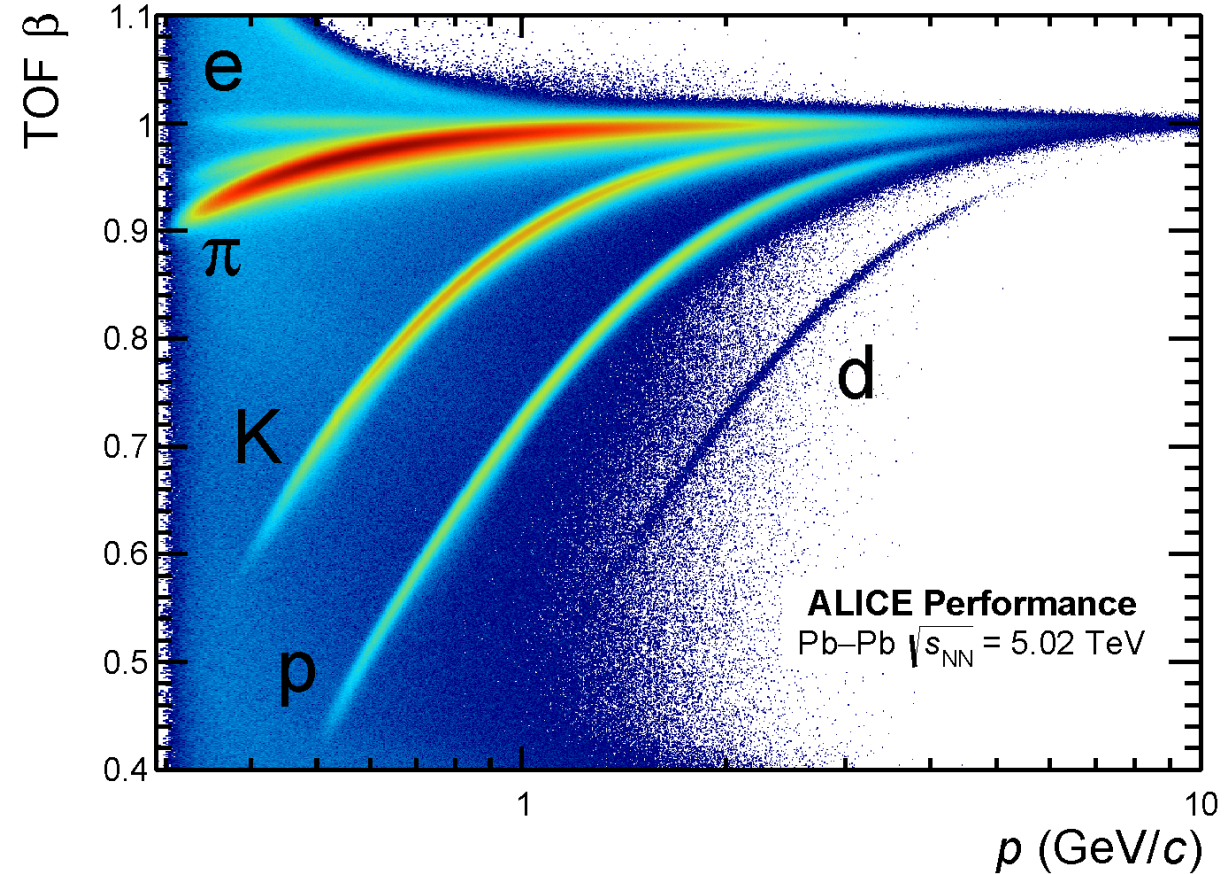
# Backup

---

# Identificazione di (anti)nuclei



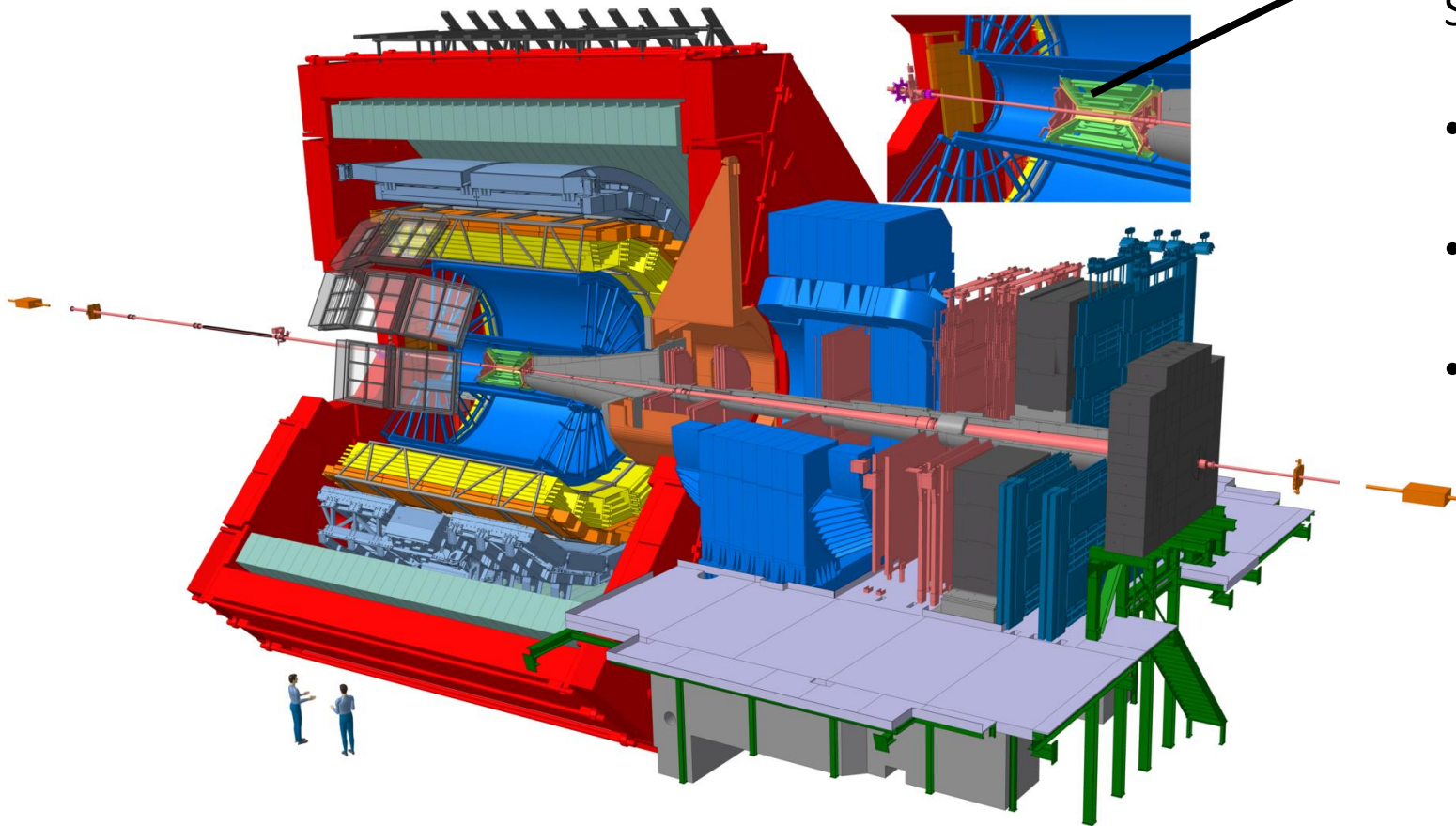
Basso  $p_T$ : identificazione tramite  $dE/dx$   
 $\sigma_{dE/dx} \sim 5.5\%$  in pp,  $\sim 7\%$  in Pb-Pb



Alto  $p_T$ : identificazione tramite tempo di volo  
 $\sigma_{PID} \sim 70$  ps in pp,  $\sim 60$  ps in Pb-Pb

ALI-PERF-106336

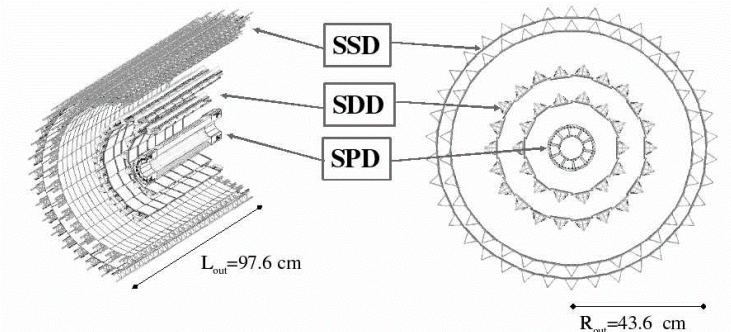




## Inner Tracking System (ITS)

Sei piani concentrici di rivelatori al silicio:

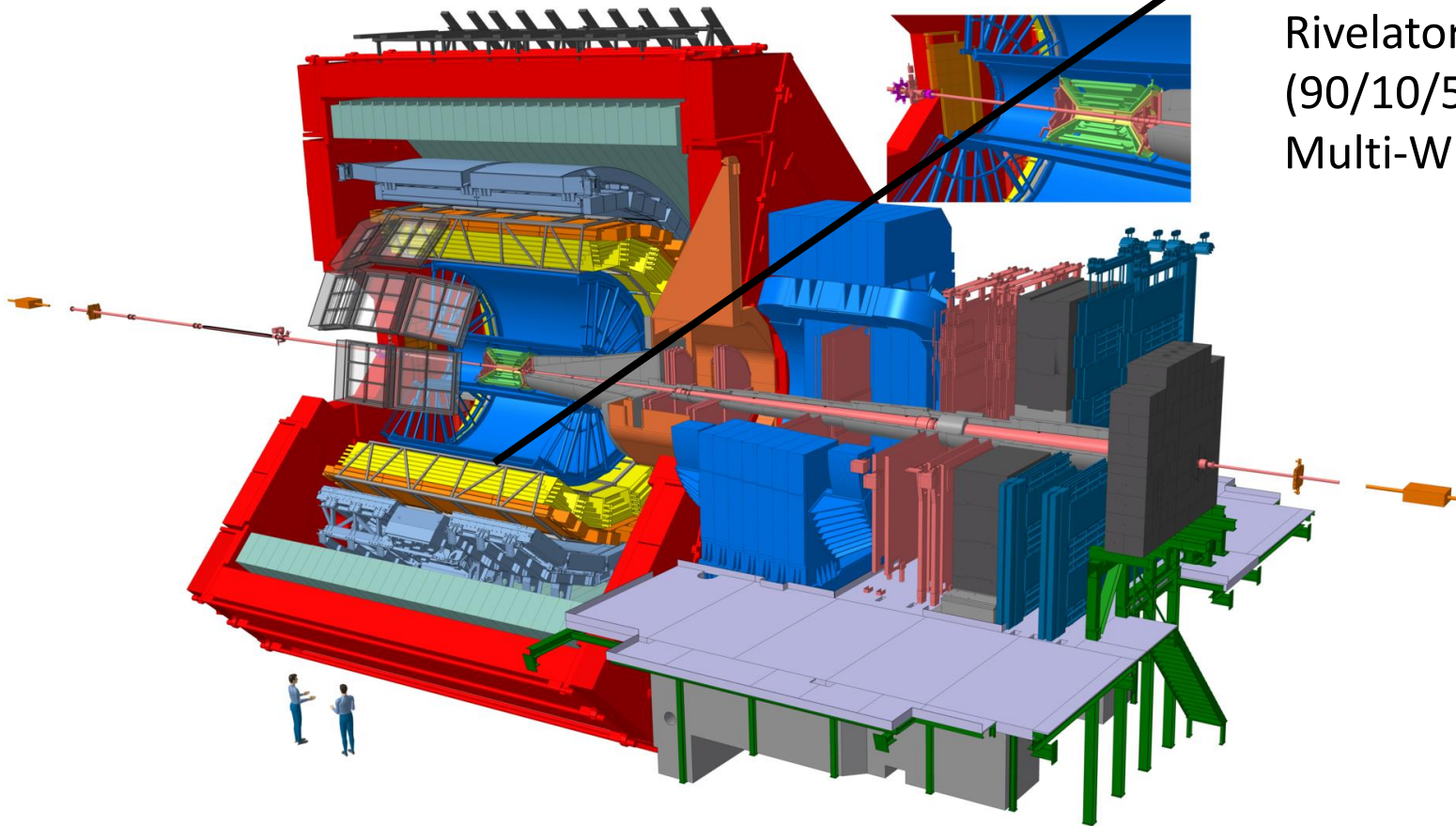
- 2 piani di rivelatori a pixel (Silicon Pixel Detectors o SPD);
- 2 piani di rivelatori a deriva (Silicon Drift Detectors o SDD);
- 2 piani di rivelatori a strisce (Silicon micro-Strip Detectors o SSD).



JINST 3 (2008) S08002

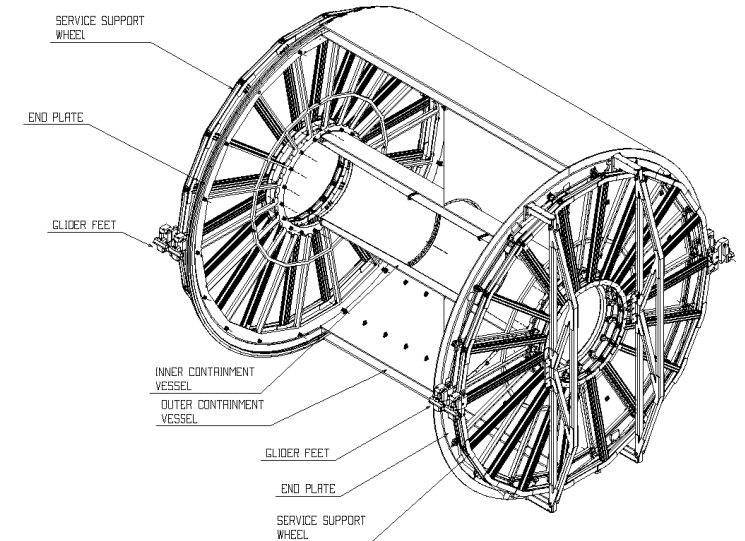
Int. J. Mod. Phys. A 29 (2014) 1430044

# L'esperimento ALICE a LHC in Run 1&2



## Time Projection Chamber (TPC)

Rivelatore cilindrico a gas, riempito con Ne/CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> (90/10/5). Il cilindro è chiuso con due piani di Multi-Wire Proportional Chambers (MWPC).



JINST 3 (2008) S08002

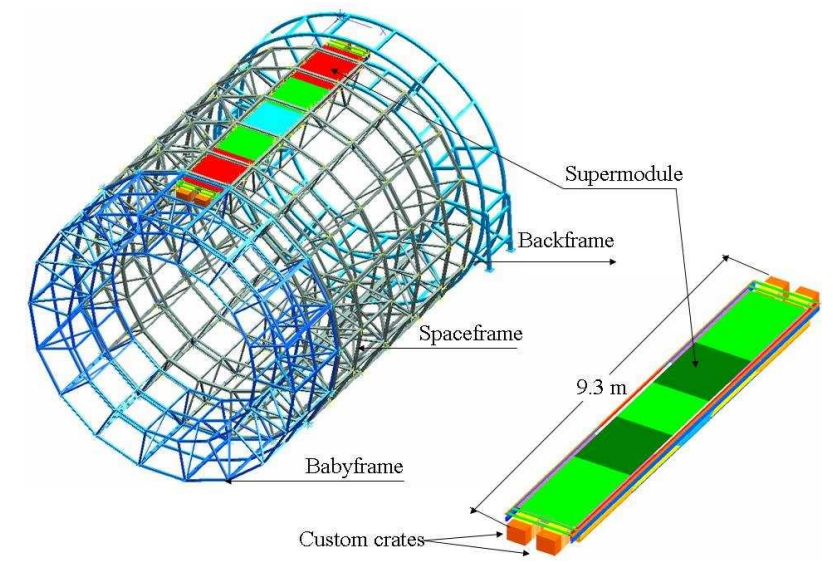
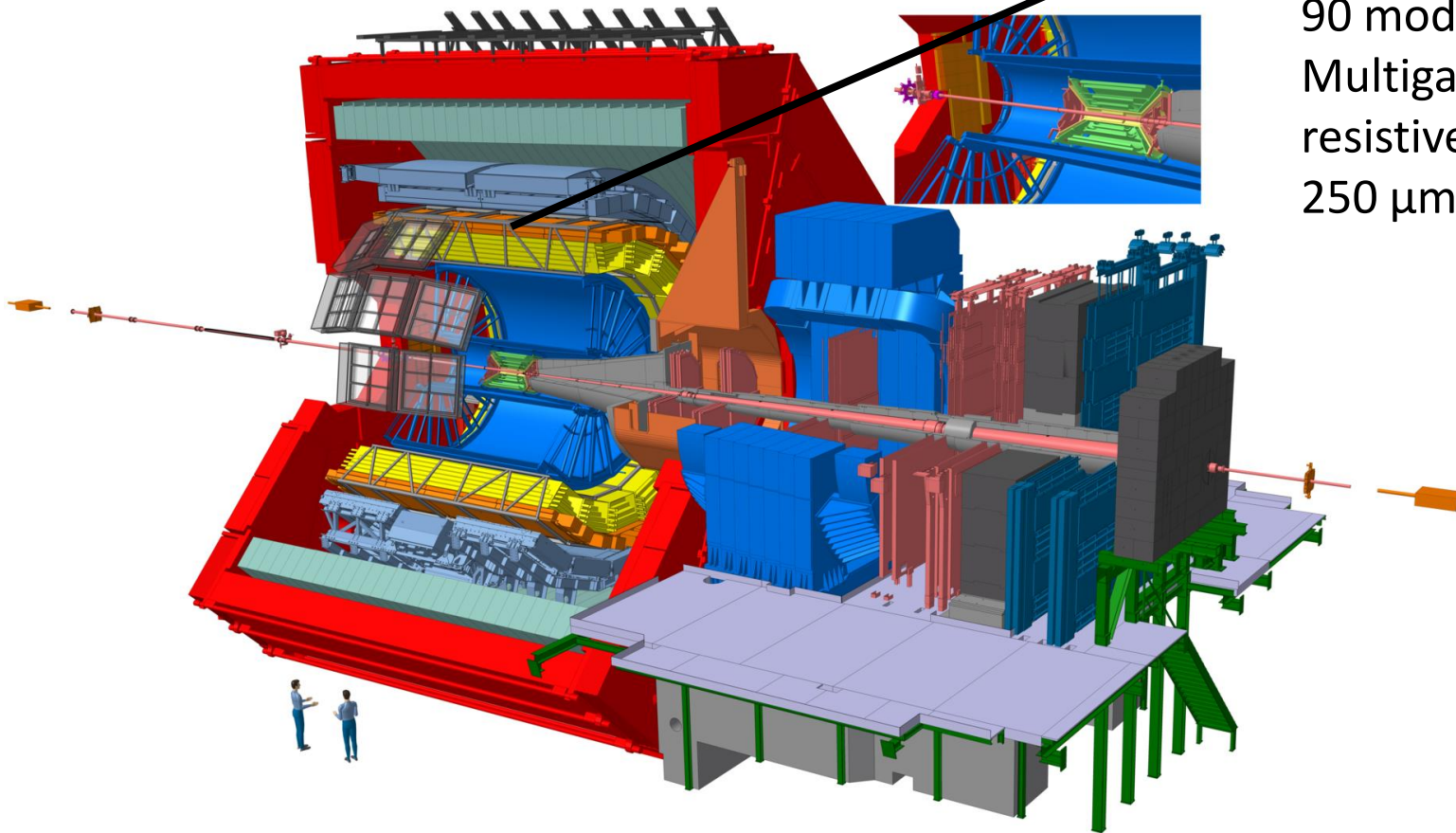
Int. J. Mod. Phys. A 29 (2014) 1430044



# L'esperimento ALICE a LHC in Run 1&2

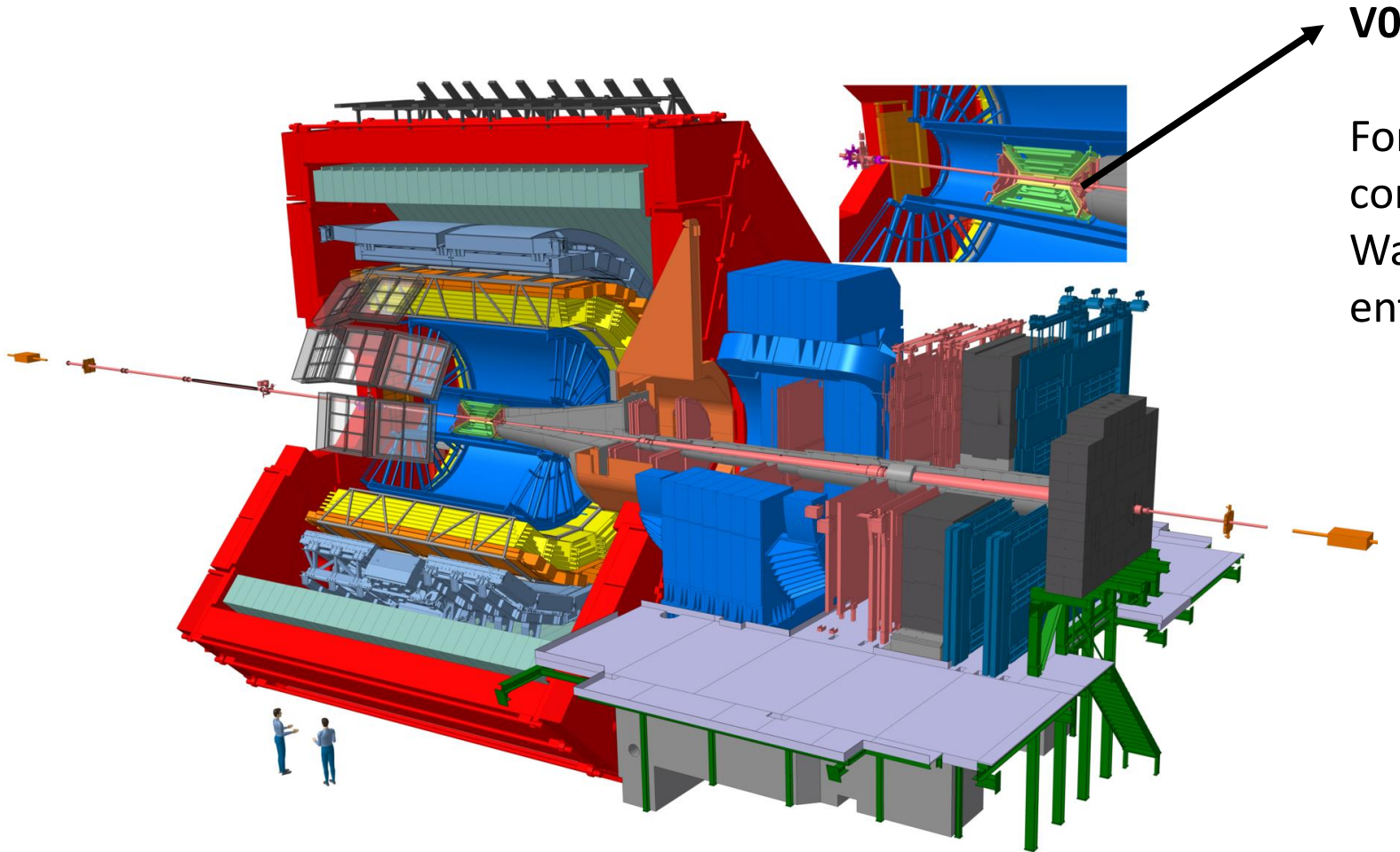
## Time Of Flight (TOF)

90 moduli formati da un sistema di 10 gaps di Multigap Resistive Plate Chambers (MRPC). I piani resistivi sono di vetro soda-lime con una gap di  $250 \mu\text{m}$ .



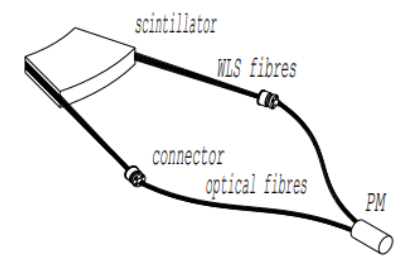
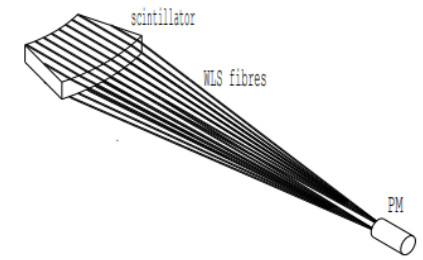
*JINST* 3 (2008) S08002  
 Int. J. Mod. Phys. A 29 (2014) 1430044

# L'esperienza ALICE a LHC in Run 1&2



**V0**

Formato da due moduli, V0A and V0C, consiste in due array di scintillatori e fibre Wave-Length Shifting (WLS), installati da entrambi i lati del punto di interazione.



*JINST* 3 (2008) S08002  
 Int. J. Mod. Phys. A 29 (2014) 1430044

# Modelli avanzati di coalescenza

- Formalismo delle funzioni di Wigner

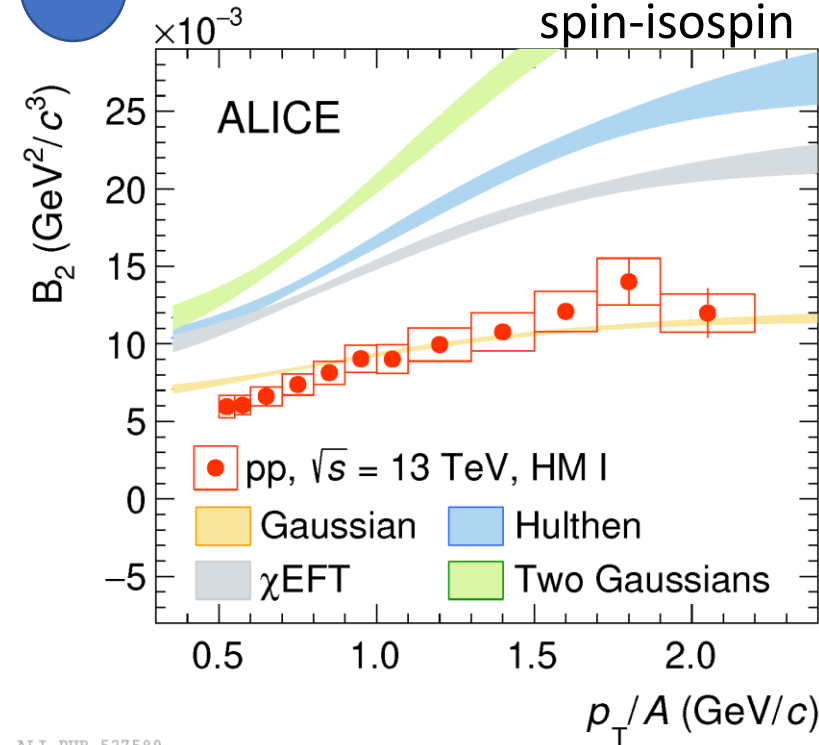
$$N_A = \underbrace{g_a}_{\text{Fattore di degenerazione spin-isospin}} \cdot \int d^3x_1 \dots d^3x_A \cdot \underbrace{d^3k_1 d^3k_A \cdot f_1(x_1, k_1) \cdot f_A(x_A, k_A)}_{\text{distribuzione nello spazio delle fasi dei nucleoni}} \cdot \underbrace{W_A(x_1, \dots, x_A, k_1, \dots, k_A)}_{\text{Funzione di densità di Wigner dei nucleoni}}$$

Fattore di degenerazione spin-isospin

distribuzione nello spazio delle fasi dei nucleoni

Funzione di densità di Wigner dei nucleoni

d

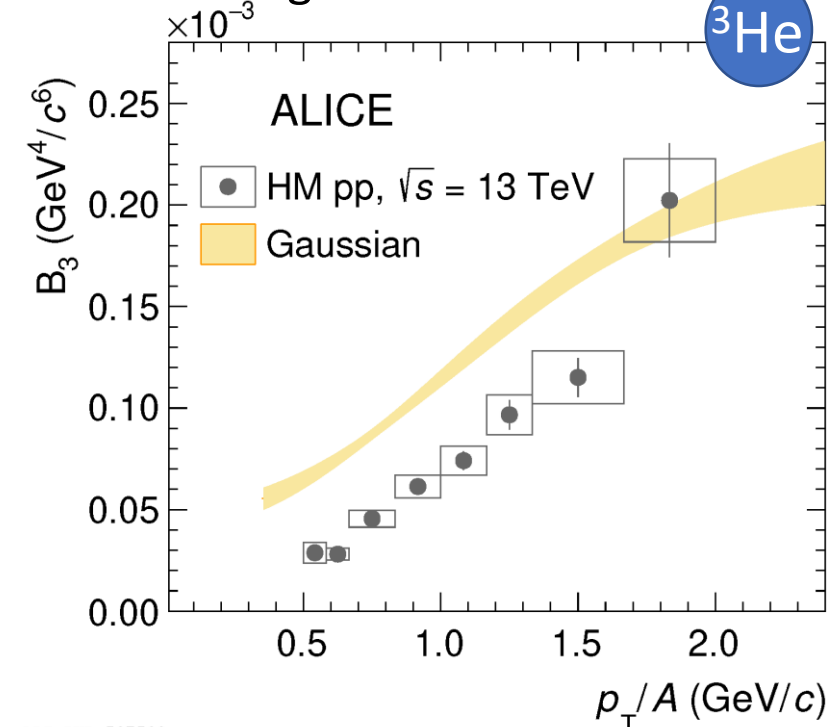


- Differenti funzioni di Wigner disponibili:

- Gaussiana: standard
- Doppia gaussiana
- Hulthén: potenziale Yukawa-like
- $\chi$ EFT: Chiral effective field theory

JHEP 01 (2022) 106

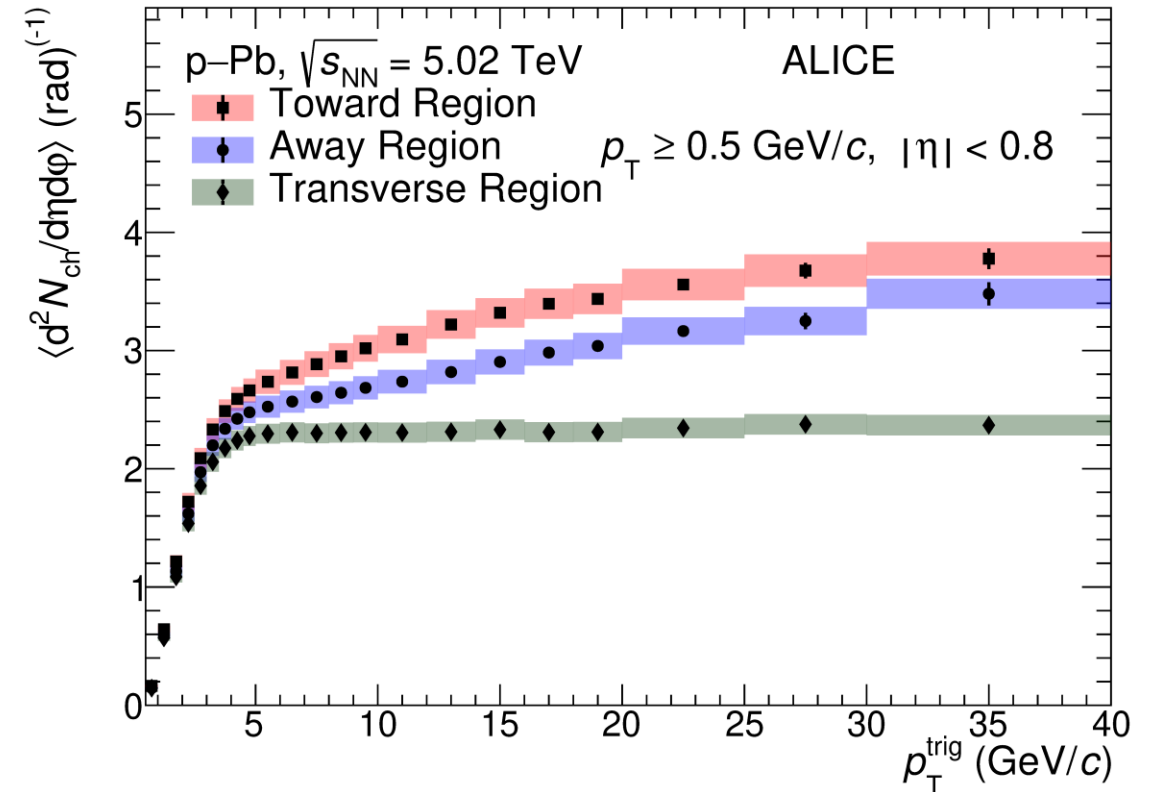
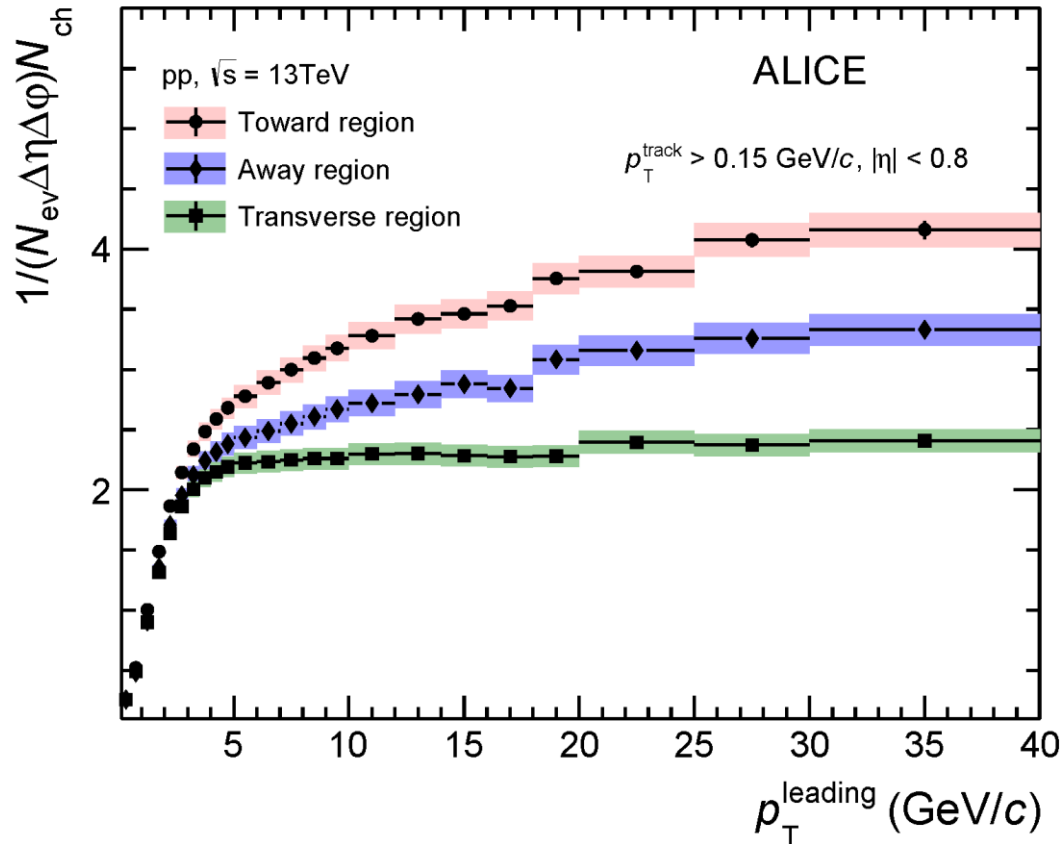
<sup>3</sup>He



# Caratterizzazione dell'underlying event

J. High Energ. Phys. 2020, 192 (2020)

arXiv:2204.10389

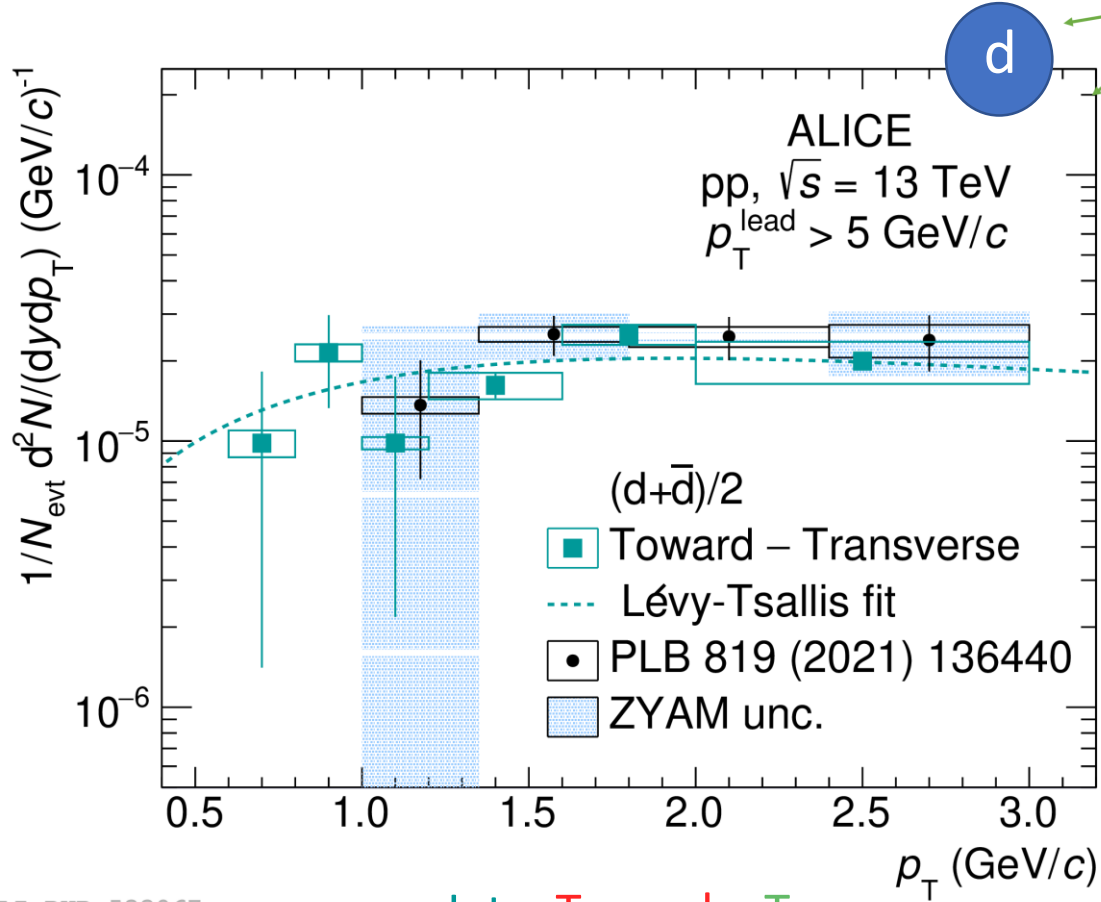
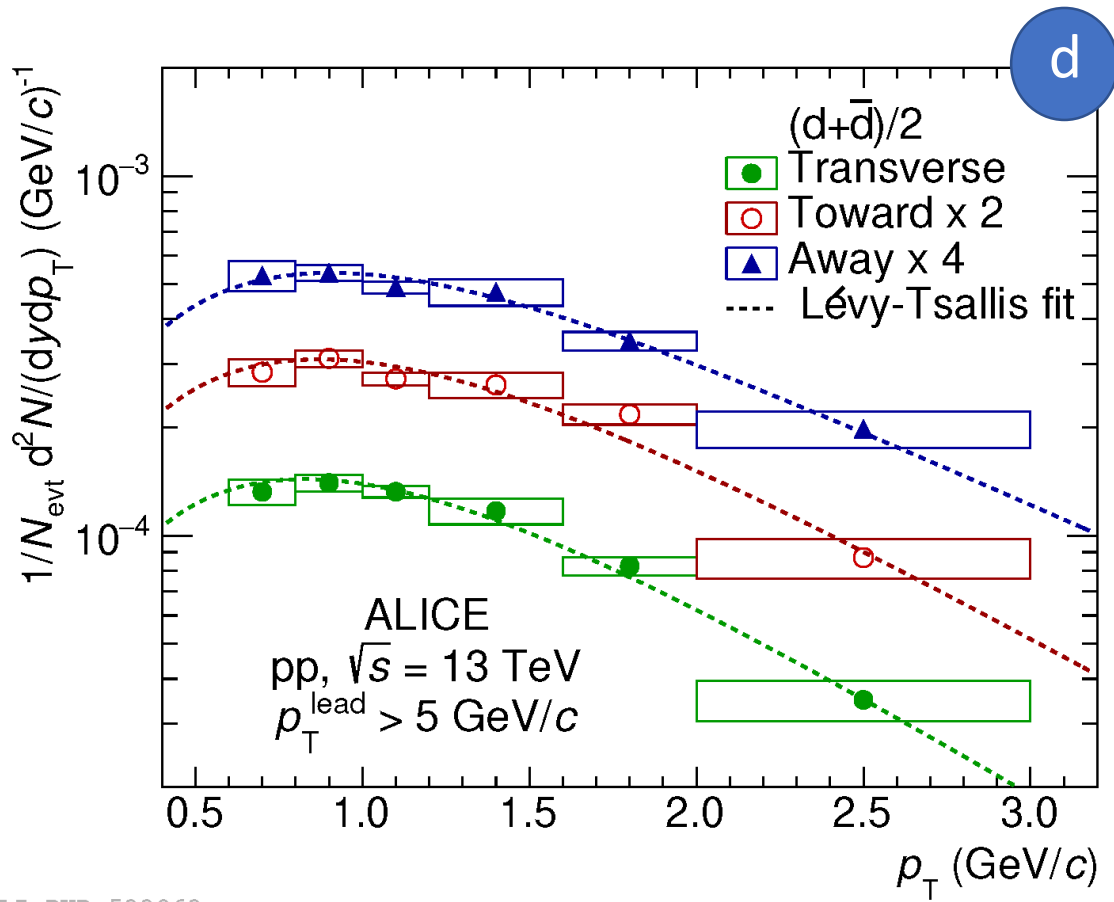
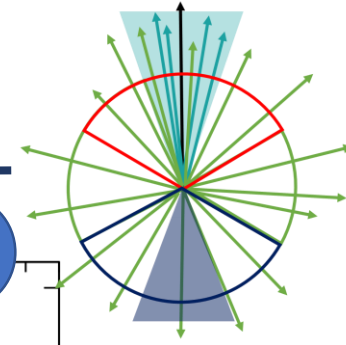


ALI-PUB-535405

- $p_{\text{T}} > 5\text{ GeV}/c \rightarrow$  plateaux nella densità di particelle cariche nella regione trasversa
- Contributo solo dall'underlying event



# Spettri in regioni azimutali



Jet = Toward – Transverse

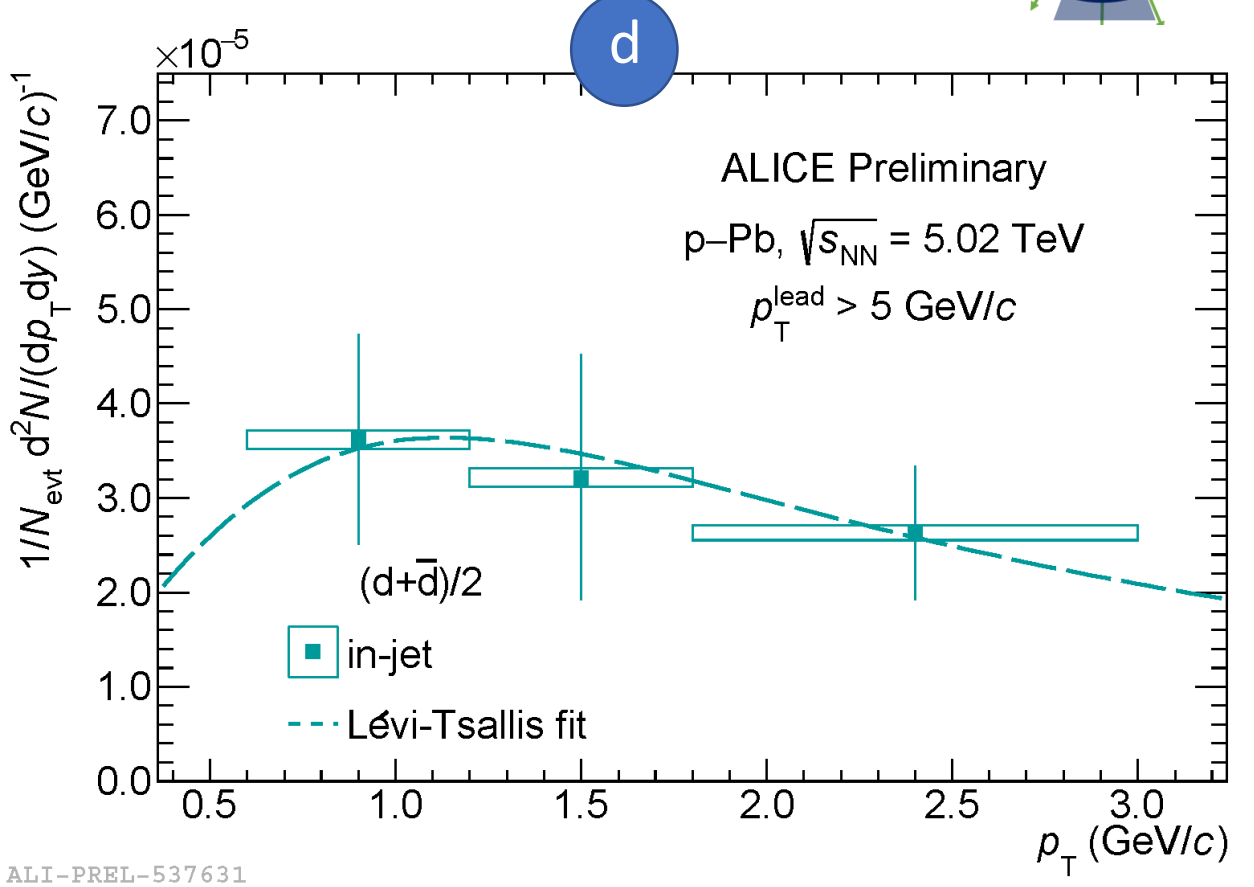
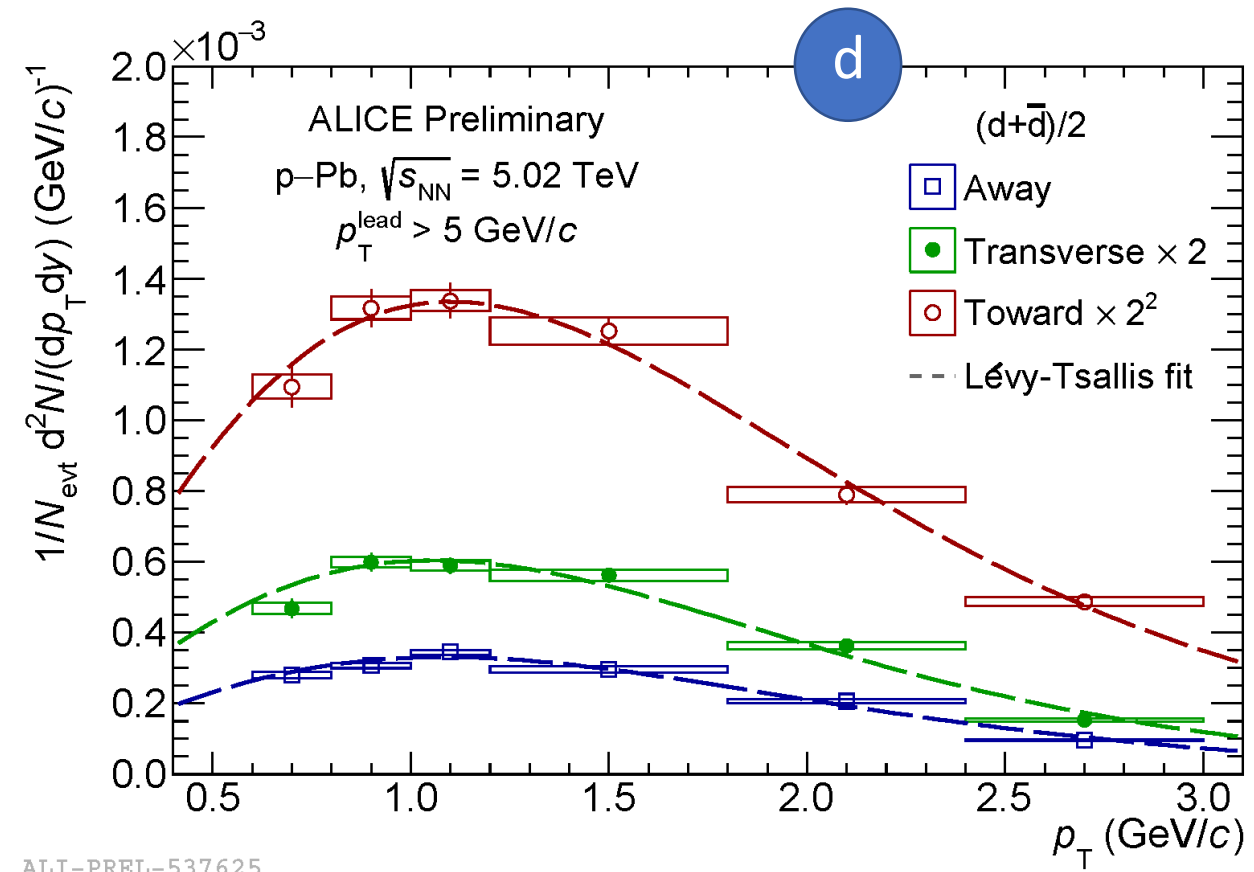
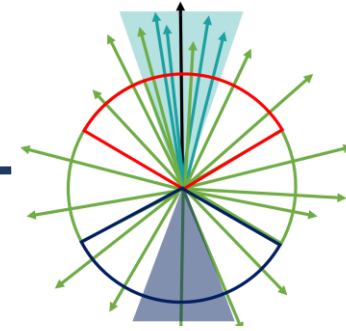
I risultati sono consistenti con quelli ottenuti usando il metodo della correlazione di due particelle (two-particles correlation method)

ALI-PUB-533063  
arXiv:2211.15204v1

ALI-PUB-533067

Produzione di deuterio in eventi con  $p_T^{\text{lead}} > 5 \text{ GeV/c}$

# Spettri in regioni azimutali

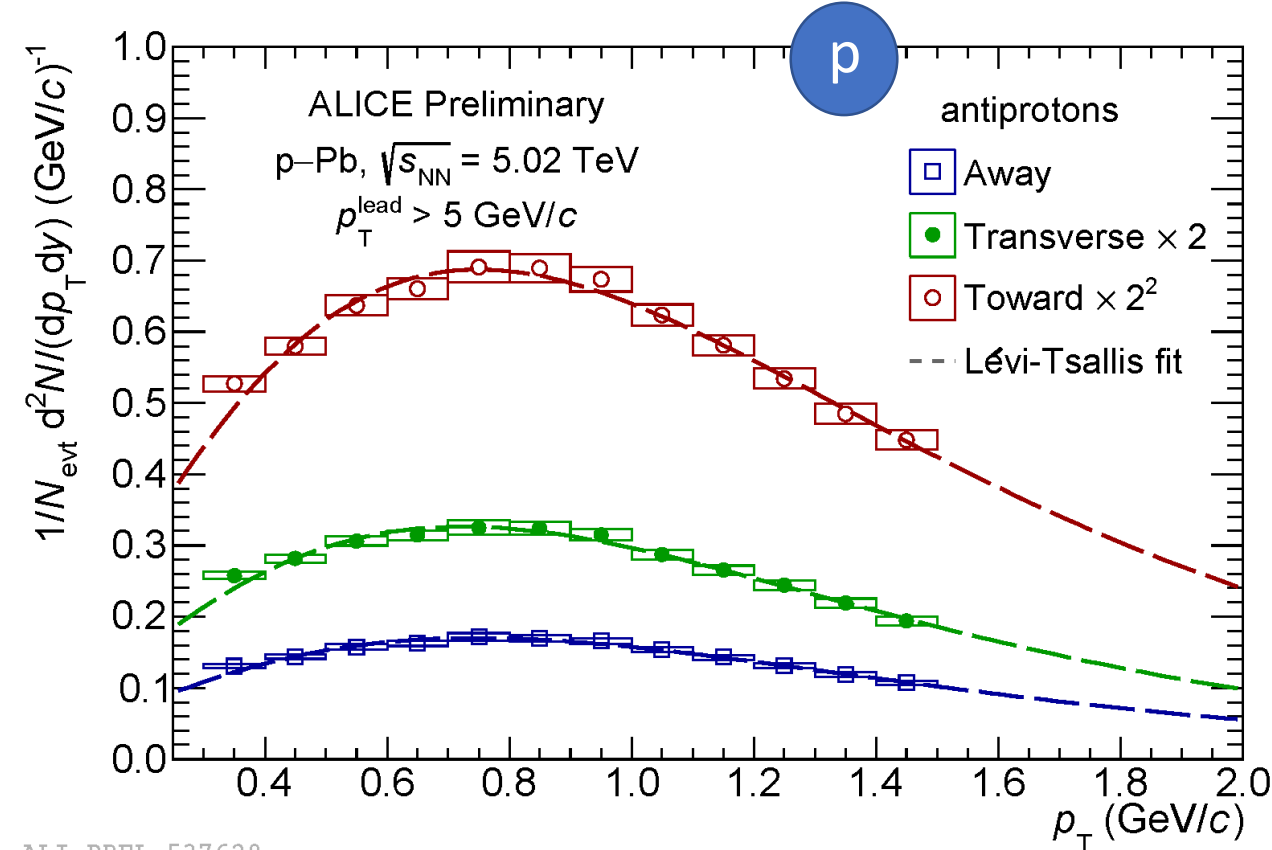
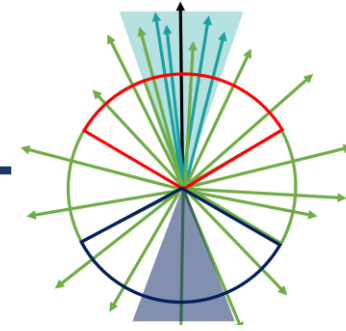


Produzione di deuterio in eventi con  $p_T^{\text{lead}} > 5 \text{ GeV}/c$

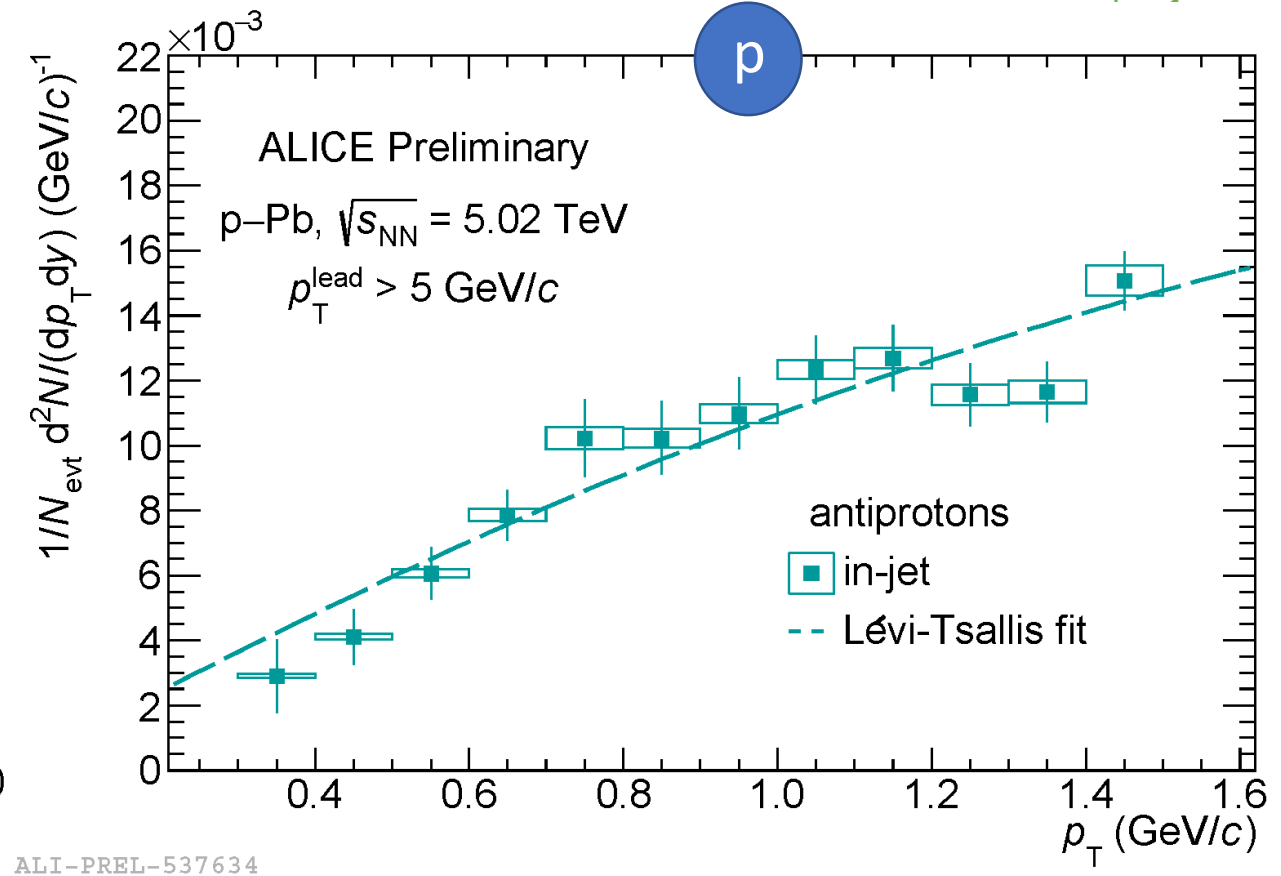
Jet = Toward - Transverse



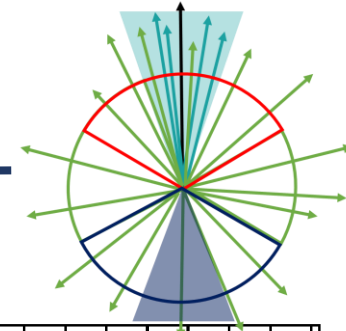
# Spettri in regioni azimutali



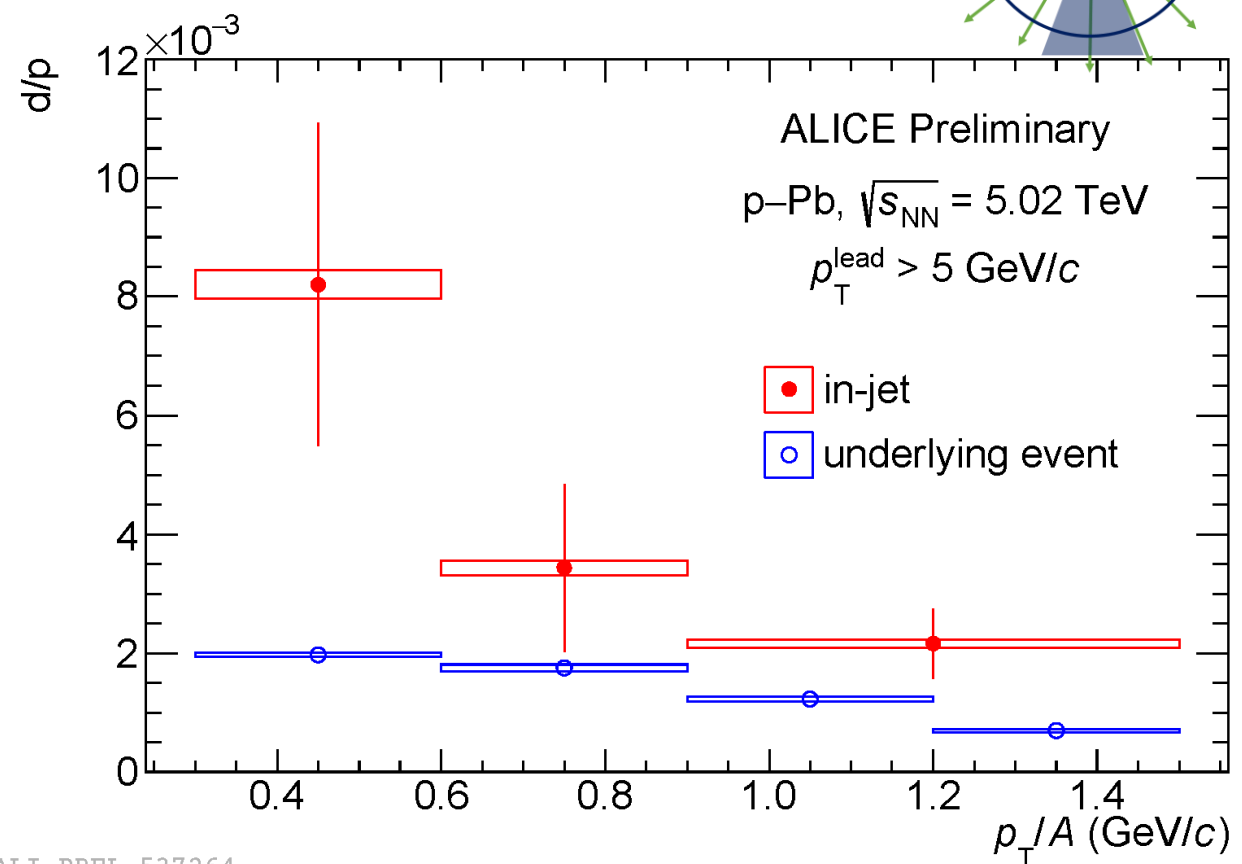
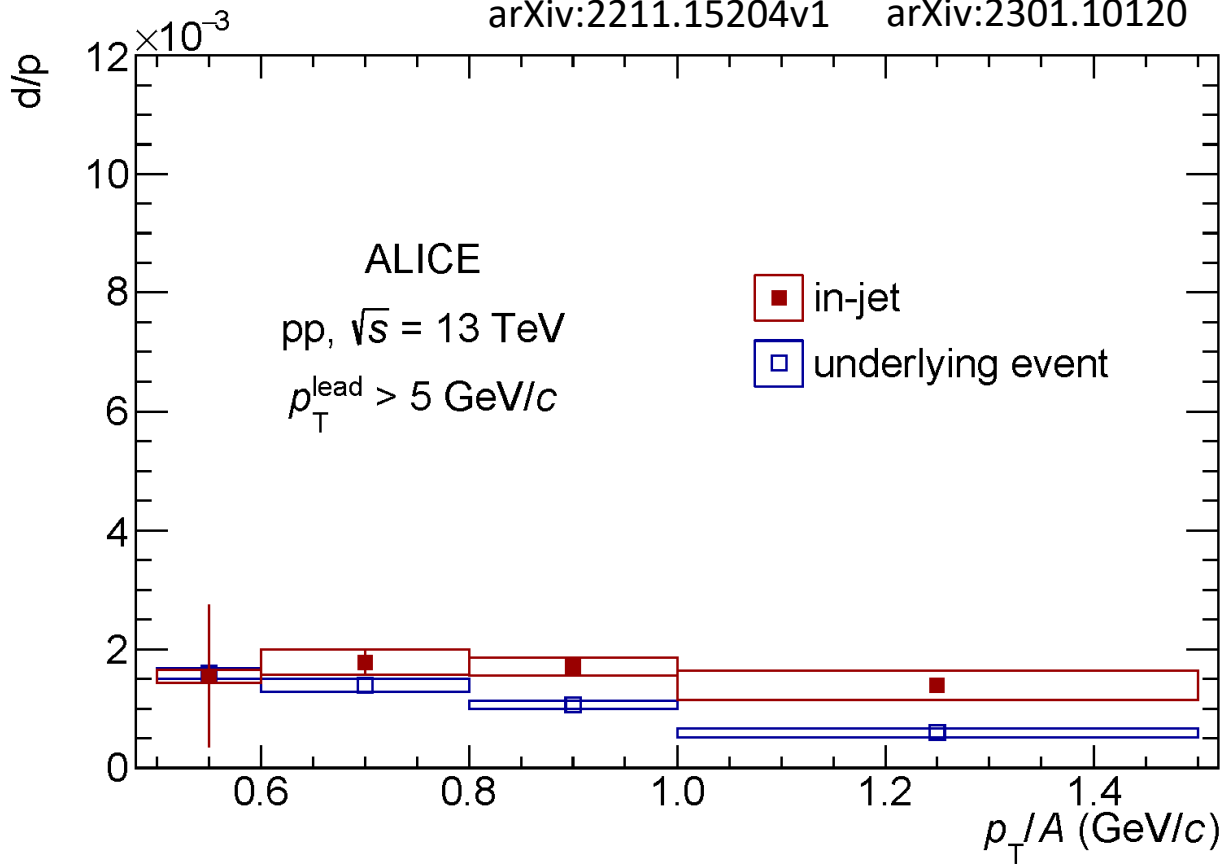
Produzione di antiprotoni in eventi con  $p_T^{\text{lead}} > 5$  GeV/c



Jet = Toward - Transverse



arXiv:2211.15204v1 arXiv:2301.10120



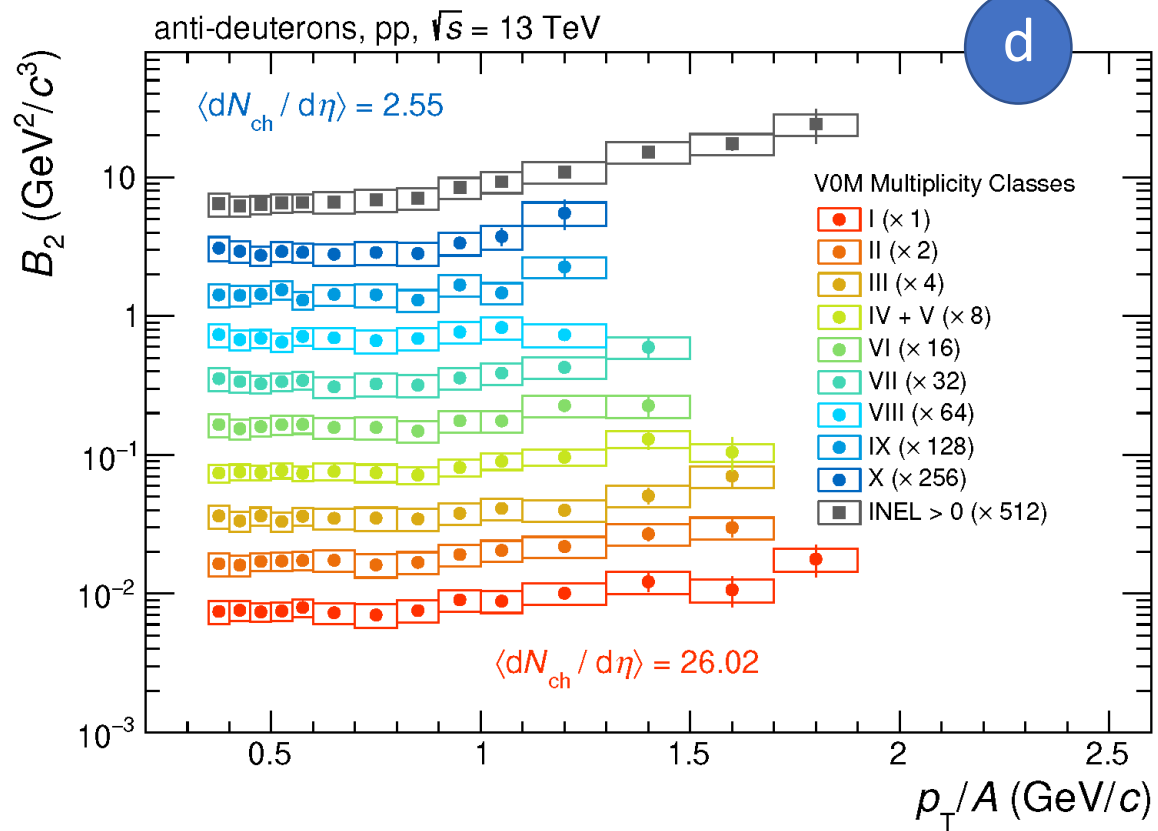
ALI-PREL-537264

- d/p calcolato come rapport degli spettri normalizzati
- d/p<sup>jet</sup> è maggiore rispetto a d/p<sup>UE</sup>

- **Maggiore d/p<sup>jet</sup> in collisioni p-Pb rispetto a collisioni pp**
- Differenza nella composizione in jet ed UE → può influire nella probabilità di coalescenza

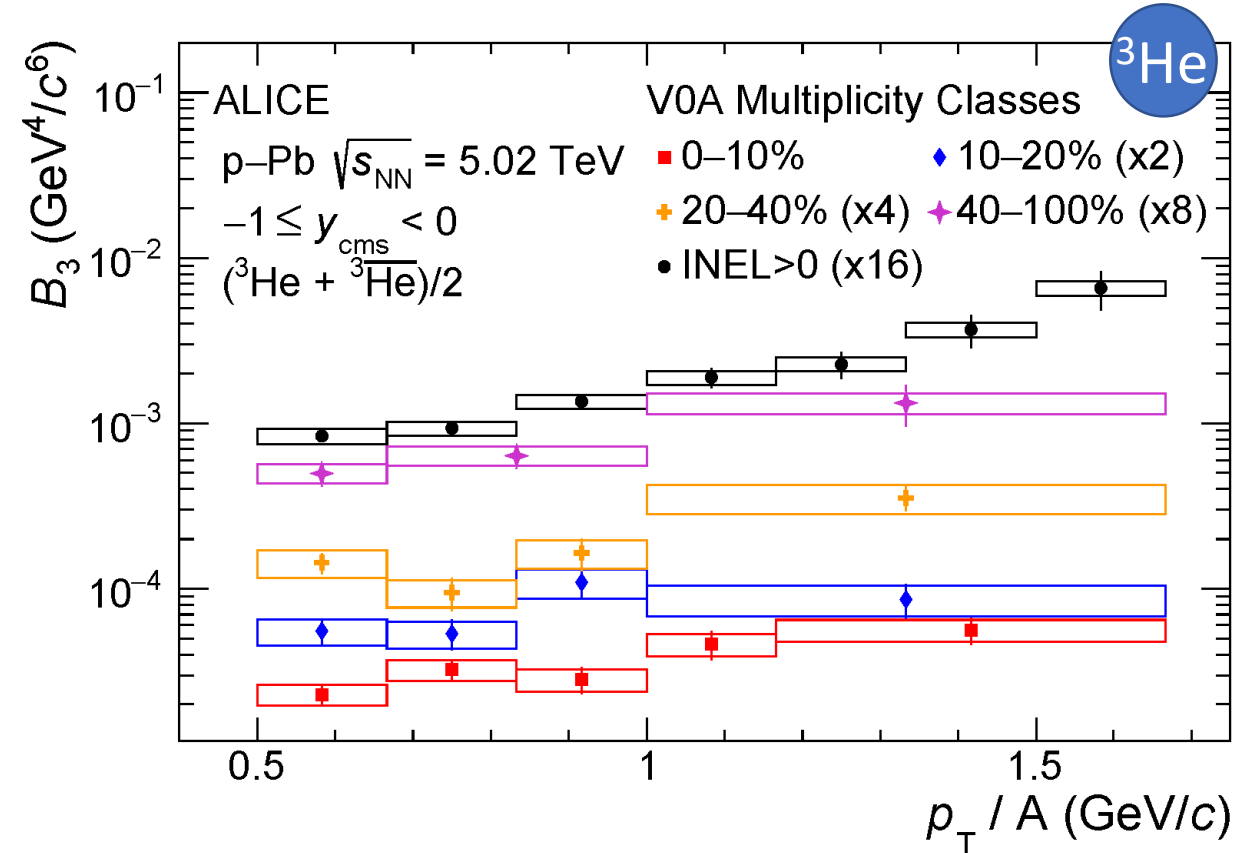
# Parametro di coalescenza

Eur. Phys. J. C 80 (2020) 889



ALI-PUB-483726

Phys. Rev. C 101 (2020) 044906



- $B_A$  è quasi costante nelle diverse classi di molteplicità, ma aumenta in funzione di  $p_T/A$  nella classe di MB

- PYTHIA 8.3:
  - Deuterio prodotto tramite reazioni ordinarie
  - Sezione d'urto dipendente dall'energia e parametrizzata sui dati
  - Reazioni:

$p + n \rightarrow \gamma + d$	$p + p \rightarrow \pi^+ + d$
$p + n \rightarrow \pi^0 + d$	$p + p \rightarrow \pi^+ + \pi^0 + d$
$p + n \rightarrow \pi^0 + \pi^0 + d$	$n + n \rightarrow \pi^- + d$
$p + n \rightarrow \pi^+ + \pi^- + d$	$n + n \rightarrow \pi^- + \pi^0 + d$
- PYTHIA 8 Monash:
  - Coalescenza semplice
  - d è formato se  $\Delta p < p_0$ , con  $p_0 = 285 \text{ MeV}/c$