

# Facility for c-deuteron production in ALICE

**Giuseppe Luciano**

**Dipartimento di Fisica e Astronomia “Augusto Righi”**

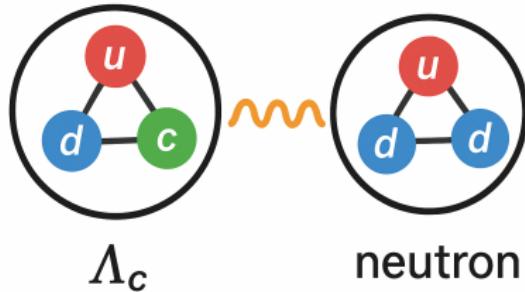
Corso di Laurea in Fisica

**Relatore:** Prof. Andrea Alici

**Correlatore:** Dott. Nicolò Jacazio

19 Settembre 2025

# C-deuteron



**Figura:** L'immagine mostra una rappresentazione schematica del c-deuteron, ipotetico stato legato fra neutrone e  $\Lambda_c^+$  mai osservato sperimentalmente

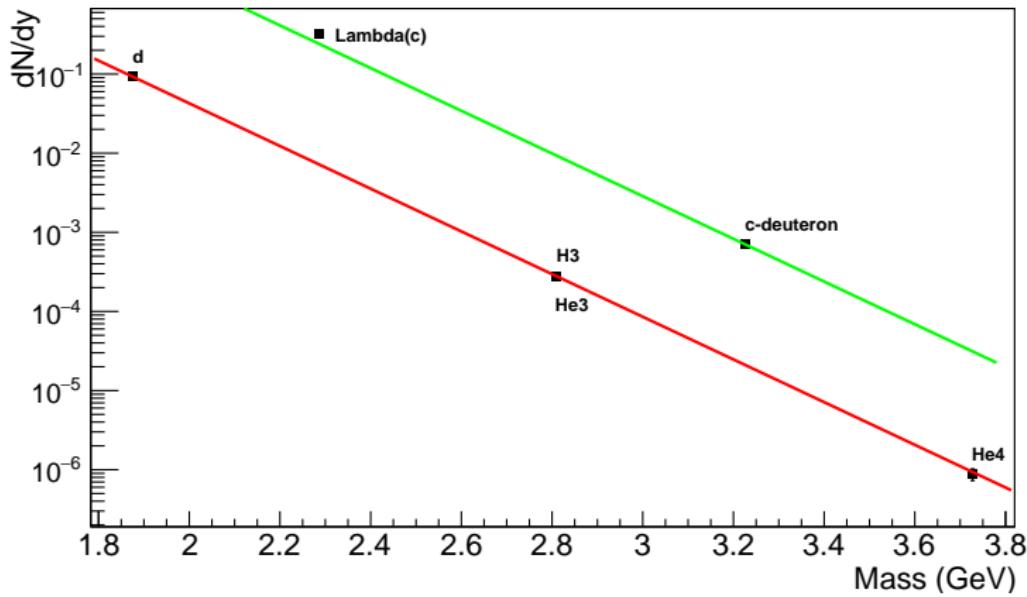
- Massa  $\Lambda_c^+$ :  $m_{\Lambda_c^+} = (2286.46 \pm 0.14) \text{ MeV}/c^2$  [1].
- Massa neutrone:  $m_N = 939.56542052(54) \text{ MeV}/c^2$  [1].
- Energia di legame del deutone:  $E_{be,d} = (2.224575 \pm 0.000009) \text{ MeV}$  [2].
- Massa c-deuteron:  $m_{c-d} \approx 3.223 \text{ GeV}/c^2$ .

# Simulazione con Thermal FIST

Parametri della simulazione:

- Fireball a simmetria sferica.
- Numero eventi generati:  $N = 2 \cdot 10^7$ .
- Ensemble gran-canonica per tutti gli adroni ad eccezione dei mesoni per i quali è stato utilizzato il formalismo basato sulla statistica di Bose-Einstein.
- Potenziale barionico:  $\mu_B = 0.71 \pm 0.45$  MeV [3].
- Potenziale della carica elettrica:  $\mu_Q = -0.18 \pm 0.90$  MeV [3].
- Fugacità di charm  $\gamma_c = 29.6 \pm 5.2$  [3].
- Temperatura di freeze-out:  $T = 156$  MeV.
- Raggio di freeze-out:  $r = 8$  fm.

# Molteplicità



**Figura:** La figura mostra  $dN/dy$  di differenti adroni per  $|y| < 0.5$ . Si sono utilizzate le unità naturali.

La relazione funzionale utilizzata per il fit è della forma  $dN/dy = ae^{bx}$ , con a e b parametri liberi.

Per gli adroni privi del quark charm si è ottenuto:

- $a = (1.057 \pm 0.014) \cdot 10^5$ .
- $b = (6.2107 \pm 0.0071) \text{ GeV}^{-1}$ .
- $\tilde{\chi}^2 = 0.16$ .

Per gli adroni contenenti il quark charm invece è stato fissato il parametro b al valore precedentemente ottenuto per poi determinare  $a = (3.534 \pm 0.021) \cdot 10^5$ . Nello specifico per il c-deuteron si è ottenuto  $(dN/dy)_{c-d} = (7.072 \pm 0.042) \cdot 10^{-4}$ .

# Variazioni nel raggio di freeze-out

Dalla meccanica statistica è noto che:

$$\langle N \rangle = \frac{1}{\beta} \left( \frac{\partial \ln Z}{\partial \mu_B} \right) \quad (1)$$

e che:

$$\boxed{\ln Z_i(T, V, \mu_i) = \frac{\Delta V g_i}{2\pi^2 \hbar^3} \int_0^\infty p^2 dp \ln \left( 1 + \theta_i e^{\beta(\mu_i - E)} \right)} \quad (2)$$

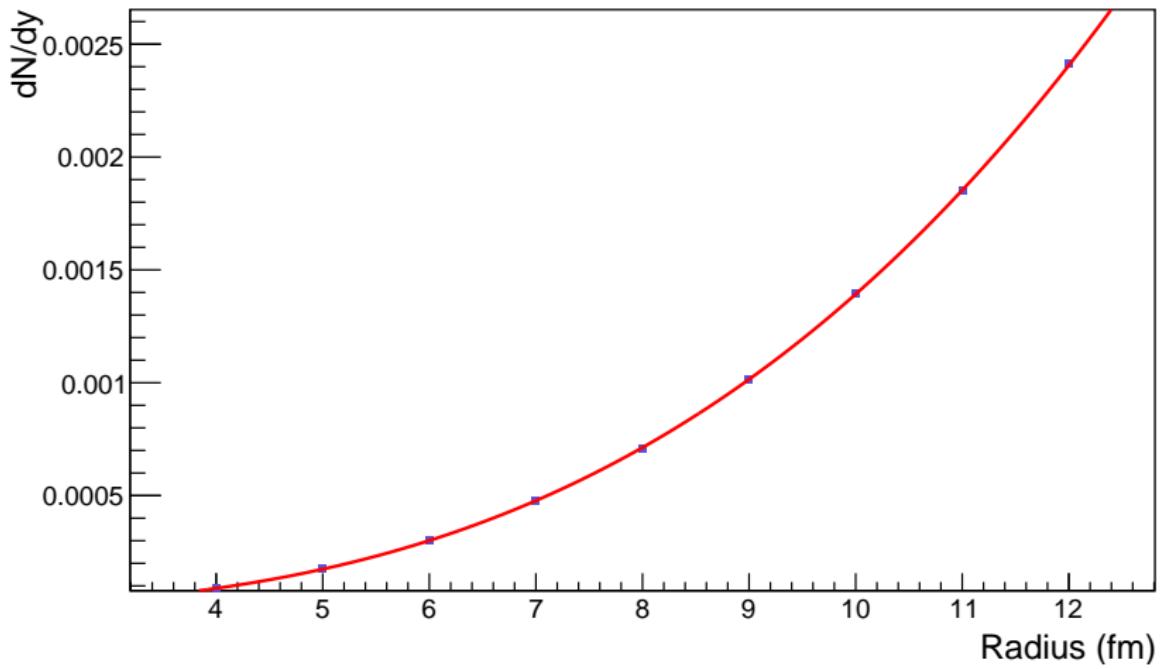
Quindi:

$$\boxed{\langle N \rangle = \frac{\Delta V g_i}{2\pi^2 \hbar^3} \int_0^\infty dp \frac{p^2}{e^{-\beta(\mu_i - E)} + \theta_i}} \quad (3)$$

Assumendo una simmetria sferica:

$$\langle N \rangle = \frac{\frac{4}{3}\pi r^3 g_i}{2\pi^2 \hbar^3} \int_0^\infty dp \frac{p^2}{e^{-\beta(\mu_i - E)} + \theta_i} \propto r^3 \quad (4)$$

# Variazioni nel raggio di freeze-out



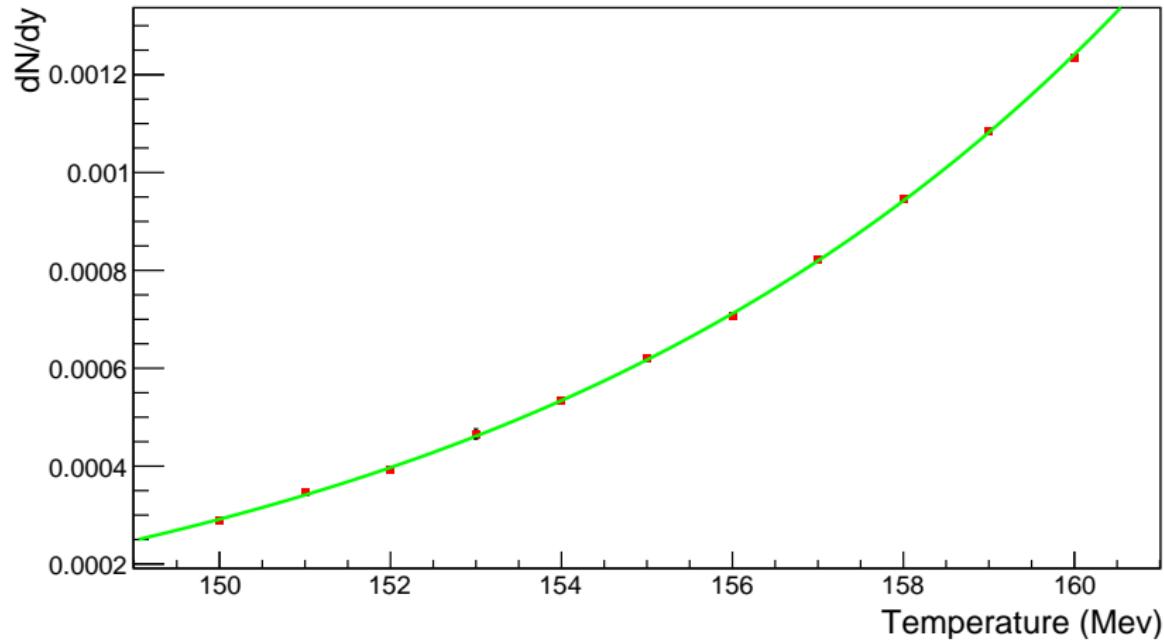
**Figura:** La figura mostra  $dN/dy$  del c-deuteron nel range  $|y| < 0.5$  per le variazioni nel raggio di freeze-out.

# Variazioni nel raggio di freeze-out

Il fit è stato eseguito utilizzando la seguente relazione funzionale  
 $dN/dy = ar^3 + b$ , con a e b parametri da determinare. I risultati del fit sono stati:

- $a = (1.3921 \pm 0.0032) \cdot 10^{-6} \text{ fm}^{-3}$ .
- $b = (2.43 \pm 0.13) \cdot 10^{-8}$ .
- $\tilde{\chi}^2 = 0.42$ .

# Variazioni nella temperatura di freeze-out



**Figura:** La figura mostra  $dN/dy$  del c-deuteron nel range  $|y| < 0.5$  per le variazioni nella temperatura di freeze-out.

## Variazioni nella temperatura di freeze-out

Il fit è stato eseguito utilizzando la seguente relazione funzionale  
 $dN/dy = ae^{bT} + c$ , con a, b e c parametri da determinare.

I risultati del fit sono:

- $a = (1.19 \pm 0.17) \cdot 10^{-12}$ .
- $b = (0.13009 \pm 0.00087) MeV^{-1}$ .
- $c = (-6.38 \pm 0.50) \cdot 10^{-6}$ .
- $\tilde{\chi}^2 = 1.0$ .

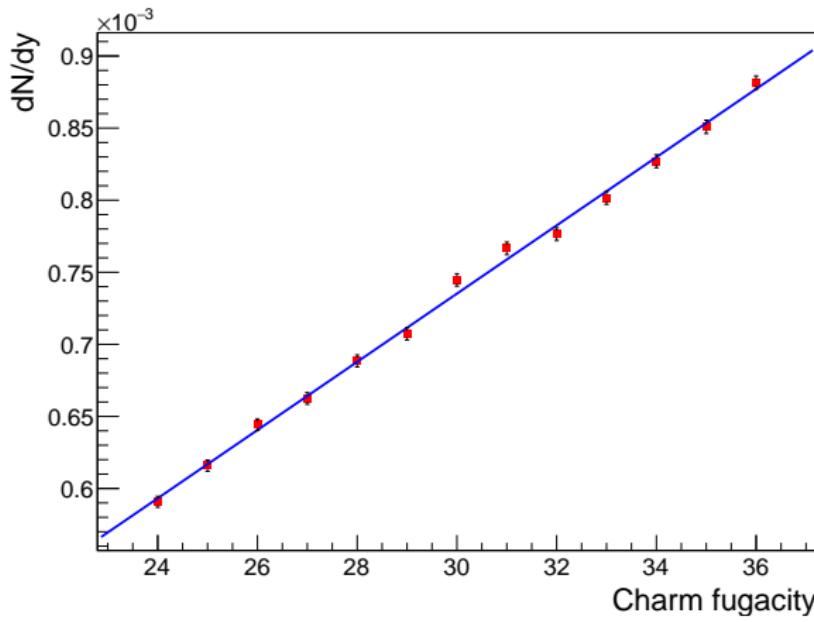
Quest'ultimo valore suggerisce che, sebbene non sia stato possibile procedere analiticamente, l'accordo fra dati simulati e la relazione empirica risulti comunque consistente.

# Variazioni nella fugacità di charm

Utilizzando la precedente relazione è possibile osservare come:

$$\begin{aligned}\langle N \rangle &= \frac{\Delta V g_i}{2\pi^2 \hbar^3} \int_0^\infty dp \frac{p^2}{e^{-\beta(\mu_i - E)} + \theta_i} \\ &\approx \frac{\Delta V g_i}{2\pi^2 \hbar^3} \int_0^\infty dp p^2 e^{\beta(\mu_i - E)} \\ &= \frac{\Delta V g_i}{2\pi^2 \hbar^3} e^{\beta \mu_i} \int_0^\infty dp p^2 e^{-\beta E} \\ &= \frac{\Delta V g_i}{2\pi^2 \hbar^3} \gamma_c e^{\beta \mu_j} \int_0^\infty dp p^2 e^{-\beta E} \\ &\propto \gamma_c\end{aligned}\tag{5}$$

# Variazioni nella fugacità di charm



**Figura:** La figura mostra  $dN/dy$  del c-deuteron nel range  $|y| < 0.5$  per le variazioni nella fugacità di charm.

# Variazioni nella fugacità di charm

Il fit è stato eseguito utilizzando la seguente relazione funzionale  
 $dN/dy = ax + b$ , con  $a$  e  $b$  parametri da determinare. I risultati del fit sono stati:

- $a = (2.366 \pm 0.032) \cdot 10^{-5}$ .
- $b = (2.53 \pm 0.94) \cdot 10^{-5}$ .
- $\tilde{\chi}^2 = 1.4$ .

# Decadimenti

Channel	Branching ratio
d $\bar{K}^0$	(2.3 $\pm$ 0.6)% $\times$ 7%
d $K^- \pi^+$	(5.0 $\pm$ 1.3)% $\times$ 7%
d $\bar{K}^*(892)$	(1.6 $\pm$ 0.5)% $\times$ 7%
d $K^0 \pi^0$	(3.3 $\pm$ 1.0)% $\times$ 7%
d $K^0 \eta$	(1.2 $\pm$ 0.4)% $\times$ 7%
d $\bar{K}^0 \pi^+ \pi^-$	(2.6 $\pm$ 0.7)% $\times$ 7%
d $K^- \pi^+ \pi^0$	(3.4 $\pm$ 1.0)% $\times$ 7%
totale	(1.36 $\pm$ 0.39)%

**Tabella:** La tabella mostra tutti i canali di decadimento considerati per la presente analisi. La prima colonna mostra i possibili prodotti del decadimento mentre la seconda i relativi branching ratio con le rispettive incertezze [4]. Il termine  $\times$  7% significa che il branching ratio deve essere ridotto per la probabilità di formare uno stato legato fra protone, derivante dal decadimento della  $\Lambda_c^+$ , e neutrone. In questo caso d indica il deutone.

# Stima dei candidati osservabili

Sotto le seguenti ipotesi:

- Il numero di collisioni effettuate dal LHC è  $N_{LHC} = 10^{10}$ , stima del numero di eventi osservati durante il run Pb-Pb del 2024;
- Sono state considerate solo le collisioni centrali, assunte pari al 5% del totale;
- La temperatura di freeze-out è 156 MeV, con un raggio di freeze-out di 8 fm e una fugacità del charm pari a 29.6, assumendo simmetria sferica;
- Le abbondanze sono derivate unicamente dai canali di decadimento elencati nella tabella precedente;
- La probabilità di formazione di uno stato legato dopo il decadimento è del 7%;
- Sono stati considerati solo i c-deuteron con  $|y| < 0.5$ .

## Stima dei candidati osservabili

Si è osservato come l'incremento del numero di deutoni la cui traccia viene ricostruita correttamente a causa del decadimento del c-deuteron è:

$$N_D = N_{LHC} \cdot p_D \cdot (dN/dy)_{c-d} \cdot \Delta y \cdot p_{central} \quad (6)$$

Dove  $N_{LHC} = 10^{10}$ ,  $p_D$  è la probabilità che venga ricostruita la traccia di un deutone proveniente dal decadimento del c-deuteron

$$p_D = (5.4823 \pm 0.0023) \cdot 10^{-3}, \quad (dN/dy)_{c-d} = (7.072 \pm 0.042) \cdot 10^{-4}.$$

$\Delta y = 1$ ,  $p_{central}$  è la probabilità che si verifichi una collisione centrale

$$p_{central} = 5\%.$$

Ottenendo:

$$N_D = (1938 \pm 12) \text{ deuteroni.}$$

# Grazie per l'attenzione.

# Bibliografia

- [1] S. Navas et al. "Review of particle physics". In: *Phys. Rev. D* 110.3 (2024), p. 030001. DOI: [10.1103/PhysRevD.110.030001](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.110.030001).
- [2] C. Van Der Leun e C. Alderliesten. "The deuteron binding energy". In: *Nuclear Physics A* 380.2 (1982), pp. 261–269. ISSN: 0375-9474. DOI: [https://doi.org/10.1016/0375-9474\(82\)90105-1](https://doi.org/10.1016/0375-9474(82)90105-1). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0375947482901051>.
- [3] Anton Andronic et al. "The multiple-charm hierarchy in the statistical hadronization model". In: *Journal of High Energy Physics* 2021 (lug. 2021). DOI: [10.1007/JHEP07\(2021\)035](https://doi.org/10.1007/JHEP07(2021)035).
- [4] C. Amsler e et al. "Review of Particle Physics". In: *Physics Letters B* 667 (1 2008), p. 1. DOI: [10.1016/j.physletb.2008.07.018](https://doi.org/10.1016/j.physletb.2008.07.018).