

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

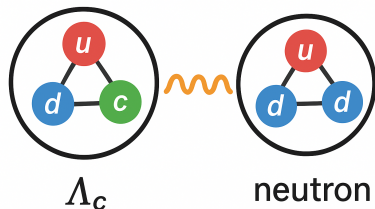


Figura: L'immagine mostra una rappresentazione schematica del c-deuteron, ipotetico stato legato fra neutrone e Λ_c^+ mai osservato sperimentalmente

- Massa Λ_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: $m_{c-d} \approx 3.223 \text{ GeV}/c^2$.

Parametri della simulazione:

- Fireball a simmetria sferica.
- Numero eventi generati: $N = 2 \cdot 10^7$.
- Ensemble gran-canonico 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.

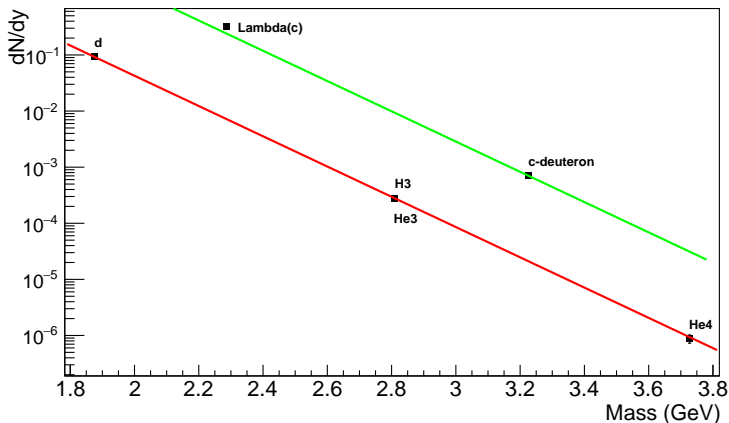


Figura: La figura mostra dN/dy di differenti adroni per $|y| < 0.5$. Si sono utilizzate le unità naturali.

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

Per i nuclei senza 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 i nuclei 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:

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

Quindi:

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

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

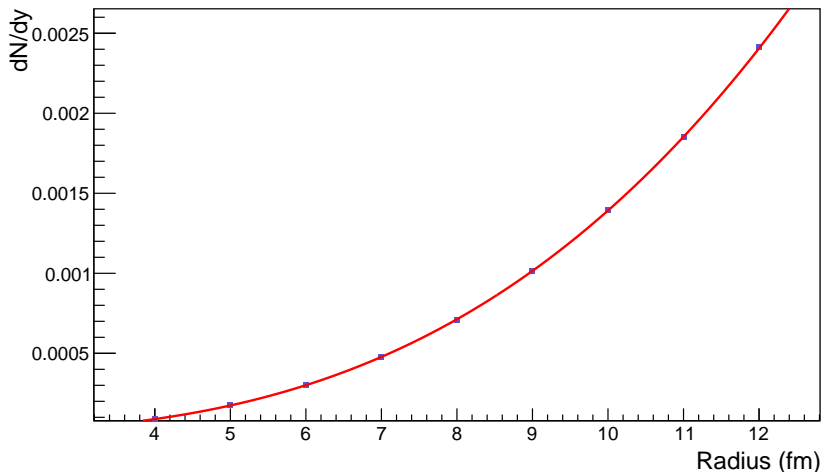


Figura: La figura mostra dN/dy del c-deuteron nel range $|y| < 0.5$ per le variazioni nel raggio di freeze-out.

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

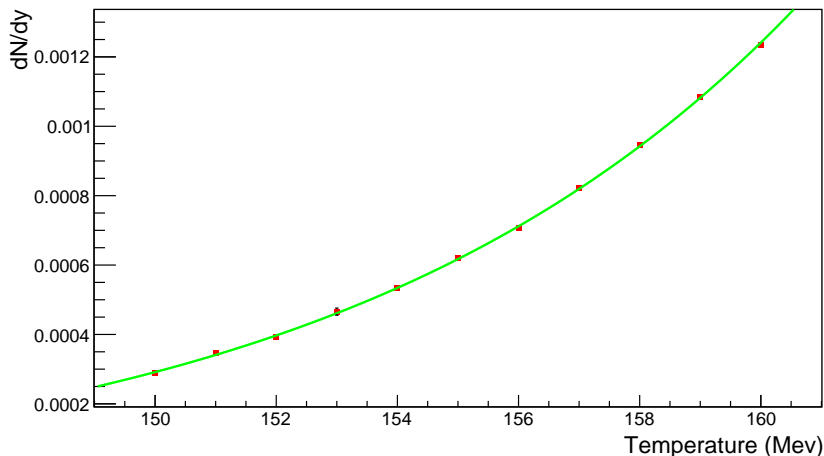


Figura: La figura mostra dN/dy del c-deuteron nel range $|y| < 0.5$ per le variazioni nella temperatura di freeze-out.

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:

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

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

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

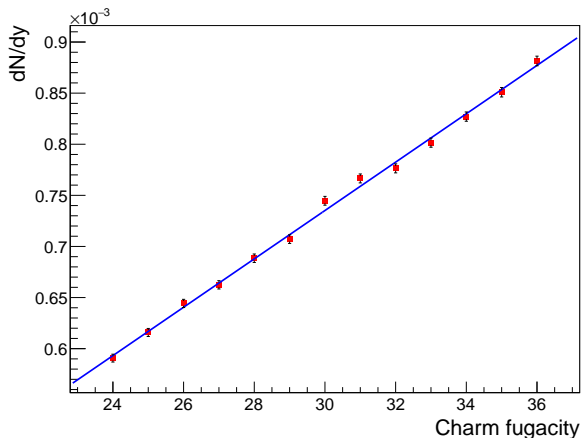


Figura: La figura mostra dN/dy del c-deuteron nel range $|y| < 0.5$ per le variazioni nella fugacità di charm.

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:

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

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 $\bar{K}^0 \pi^0$	$(3.3 \pm 1.0)\% \times 7\%$
d $\bar{K}^0 \eta$	$(1.2 \pm 0.4)\% \times 7\%$
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. 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 Λ_c , e neutrone. In questo caso d indica il deutone.

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 $|y| < 0.5$.

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

$$p_D = \frac{N_{detect}}{10^9} = (5.4823 \pm 0.0023) \cdot 10^{-3},$$
$$(dN/dy)_{c-d} = (7.072 \pm 0.042) \cdot 10^{-4}. \quad \Delta y = 1, \quad p_{central} \text{ è la probabilità che si verifichi una collisione centrale } p_{central} = 5\%.$$

Ottenendo:

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

Grazie per l'attenzione.

- [1] S. Navas et al. “Review of particle physics”. In: *Phys. Rev. D* 110.3 (2024), p. 030001. DOI: 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.
- [4] *Technical Design Report for the Muon Forward Tracker*. Rapp. tecn. 2015. URL: <https://cds.cern.ch/record/1981898>.
- [5] ALICE Collaboration. *Letter of intent for ALICE 3: A next-generation heavy-ion experiment at the LHC*. 2022. arXiv: 2211.02491 [physics.ins-det]. URL: <https://arxiv.org/abs/2211.02491>.