

Etude des multiplicités de clusters émis à mi-vitesse dans les collisions d'ions lourds dans la gamme d'énergie de bombardement de 80 à 250 MeV/nucléon.

Eric Bonnet - Subatech

September 17, 2024

Introduction

Questions générales

Choix pris pour cette analyse

Présentation des données INDRA utilisées

Liste des réactions

Sélection des clusters et construction des multiplicités

Rappel des équations utilisées pour la procédure d'ajustement

Nombre de densité dans l'approche Grand Canonique (GC)

Détails sur les ingrédients de la procédure

Comparaison et résultats

Comparaison des isotopes d'Hydrogène et d'Hélium

Conclusion

Introduction (I)

Questions générales:

- ▶ Quels formalismes permettent la description des taux de production des clusters dans les collisions d'ions lourds aux énergies de Fermi?
- ▶ Comment peut on extraire des informations pouvant être mise en perspectives avec d'autres mesures expérimentales?

Introduction (II)

Choix pris pour cette analyse:

- ▶ En s'inspirant des analyses "hautes énergies", on se concentre sur l'éjection de la matière dans le plan transverse de la réaction dans une fenêtre en vitesse longitudinale que l'on compare au modèle thermique.
- ▶ On suppose que la population du plan transverse par l'ensemble des collisions construit un ensemble statistique cohérent ou les taux de productions des différents clusters peuvent être décrits par des conditions thermodynamiques uniques.

Liste des réactions (I)

Systèmes	E_{bomb}	$E_{av}^{(CM)}$	$\beta_{CM}^{(lab)}$	A_{tot}	Y_p
$^{58}\text{Ni} + ^{58}\text{Ni}$	82	19.0	0.205	116	0.48
$^{58}\text{Ni} + ^{58}\text{Ni}$	90	20.9	0.215	116	0.48
$^{129}\text{Xe} + ^{124}\text{Sn}$	80	18.9	0.207	253	0.41
$^{129}\text{Xe} + ^{112}\text{Sn}$	100	23.6	0.241	241	0.43
$^{124}\text{Xe} + ^{124}\text{Sn}$	100	23.7	0.226	248	0.42
$^{129}\text{Xe} + ^{124}\text{Sn}$	150	35.8	0.278	253	0.41
$^{124}\text{Xe} + ^{124}\text{Sn}$	250	59.6	0.344	248	0.42
$^{197}\text{Au} + ^{197}\text{Au}$	80	19.4	0.203	394	0.40
$^{197}\text{Au} + ^{197}\text{Au}$	100	24.3	0.226	394	0.40
$^{197}\text{Au} + ^{197}\text{Au}$	150	36.4	0.273	394	0.40

Table: Tableau récapitulatif des réactions étudiées. Les énergies incidentes (E_{bomb}) et énergie disponible dans le centre de masse de la réaction ($E_{av}^{(CM)}$) sont en MeV/nucléon. La vitesse du centre de masse de la réaction ($\beta_{CM}^{(lab)}$) est utilisée pour déterminer la zone de mi-vitesse.

Liste des réactions (II)

Systèmes	E_{bomb}	M_{trig}	N_{runs}	N_{evts}
$^{58}\text{Ni}+^{58}\text{Ni}$	82	4	17	5.580583e+06
$^{58}\text{Ni}+^{58}\text{Ni}$	90	4	31	8.819494e+06
$^{129}\text{Xe}+^{124}\text{Sn}$	80	3	27	6.716808e+06
$^{129}\text{Xe}+^{112}\text{Sn}$	100	3	37	1.045168e+07
$^{124}\text{Xe}+^{124}\text{Sn}$	100	3	38	1.237740e+07
$^{129}\text{Xe}+^{124}\text{Sn}$	150	3	15	3.253921e+06
$^{124}\text{Xe}+^{124}\text{Sn}$	250	3	11	2.123475e+06
$^{197}\text{Au}+^{197}\text{Au}$	80	3	28	3.963544e+06
$^{197}\text{Au}+^{197}\text{Au}$	100	3	37	4.991852e+06
$^{197}\text{Au}+^{197}\text{Au}$	150	5	21	4.430794e+06

Table: Tableau récapitulatif du nombre de runs, de la multiplicité de déclenchement et nombre d'événements collectés. Fichiers de données régénérés.

Rappel de la sélection des clusters pour construire les multiplicités. (I)

On se place dans le repère du laboratoire.

On sélectionne les clusters émis dans le plan transverse à la direction du faisceau (direction longitudinale) on définit pour l'ensemble des réactions la même fenêtre $\Delta\beta_{long} = 0.019$. Les clusters sélectionnés remplissent donc la condition suivante sur leur vitesse longitudinale : $|\beta_{long} - \beta_{CM}^{(lab)}| \leq \frac{\Delta\beta_{long}}{2}$.

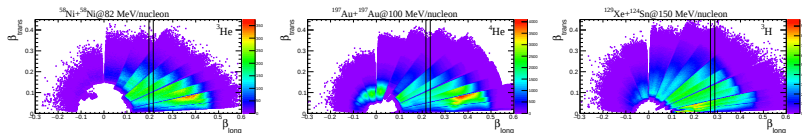
Les télescopes ayant une ouverture angulaire polaire et azymuthal, les clusters sont donc décrits avec une densité de probabilité de présence uniforme sur la fenêtre d'entrée de son télescope :

$$P = \int_{\theta_{min}}^{\theta_{max}} \int_{\phi_{min}}^{\phi_{max}} d\cos\theta \cdot d\phi = 1.$$

On réalise donc l'intersection de cette densité de probabilité et la condition sur la vitesse longitudinale.

Rappel de la sélection des clusters pour construire les multiplicités. (II)

Figure: Trois exemples de diagrammes $\beta_t - \beta_l$ et la sélection en vitesse longitudinale associée.

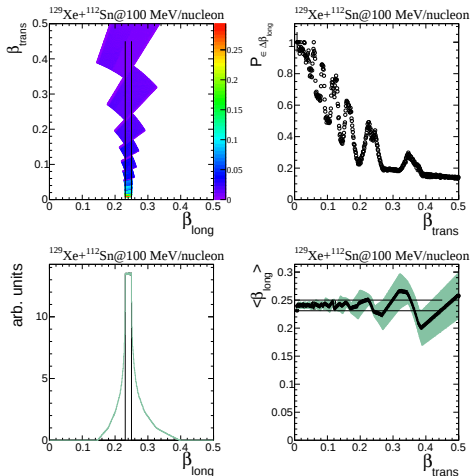


Comme on étudie l'éjection dans le plan transverse on se place dans le cas d'une dimension $D=2$ dans la suite. Sur l'ensemble des événements, on cumule les taux de comptage des clusters pour obtenir les taux de productions $Y_i^{(exp)}|_{\in \Delta\beta_{long}}$ que l'on normalise aux nombres d'événements N_{evts} :

$$m_i^{(exp)} = \frac{Y_i^{(exp)}}{N_{evts}} \quad (1)$$

Rappel de la sélection des clusters pour construire les multiplicités. (III)

Figure: Trois exemples de diagrammes $\beta_t - \beta_l$ et la sélection en vitesse longitudinale associée.



Lien entre densité, température et potentiels chimiques dans l'ensemble Grand Canonique (I)

On se place dans un milieu de nucléons à la température T , de dimension D . Si on considère un type de particule définie par sa masse et son spin, le potentiel chimique (μ) décrit le coût énergétique associé à la variation du nombre de cette particule dans ce milieu et on a la relation suivante¹ :

$$n^{(GC)} = g_s \frac{1}{\lambda_T^D} e^{\frac{\mu - M}{T}} \quad (2)$$

$$g_s = (2s + 1) \quad (3)$$

$$\lambda_T = \frac{h}{\sqrt{2\pi MT}} \quad (4)$$

Hypothèse 1, une seule température (T) permet de décrire les densités des clusters possiblement présents dans le milieu.

¹cinématique classique et statistique de Maxwell-Boltzmann

Lien entre densité, température et potentiels chimiques dans l'ensemble Grand Canonique (II)

Utilisation de deux potentiels chimiques associés aux deux quantités conservées : le nombre baryonique (B) et la charge électrique (Q).

$$\mu_i = \mu(Z_i, A_i) = A_i\mu_B + Z_i\mu_Q \quad (5)$$

$$\mu_i = \mu(Z_i, A_i) = A_i\tilde{\mu} + (A_i - 2Z_i)\mu_3 \quad (6)$$

$$\tilde{\mu} = \mu_B + \frac{1}{2}\mu_Q \quad (7)$$

$$\mu_3 = -\frac{1}{2}\mu_Q \quad (8)$$

Hypothèse 2, le potentiel chimique des clusters peut se réduire à la relation mettant en jeu deux paramètres supplémentaires $\{\mu_B, \mu_Q\}$ ou $\{\tilde{\mu}, \mu_3\}$.

Implémentation de la procédure d'ajustement (I)

Utilisation des données disponibles dans la base de données KaliVeda².

- Masses (M), Spin (s) et temps de demi-vie ($\tau_{1/2}$) de l'ensemble des états fondamentaux mesurés jusqu'aux isotopes de carbone.

$$M_i = M_i^{(bare)} - BE_i$$

$$M_i^{(bare)} = Z_i M_{proton} + (A_i - Z_i) M_{neutron}$$

$$M_{proton} = 938.27208 \text{ MeV}$$

$$M_{neutron} = 939.56541 \text{ MeV}$$

²traitement effectué par KaliVeda (classe KVNucleus):

$$BE_i = Z_i \delta_{proton} + (A_i - Z_i) \delta_{neutron} - \delta M_i \text{ with } \delta M_i = \delta M_i^{(db)} - Z_i \times M_e$$

Implémentation de la procédure d'ajustement (II)

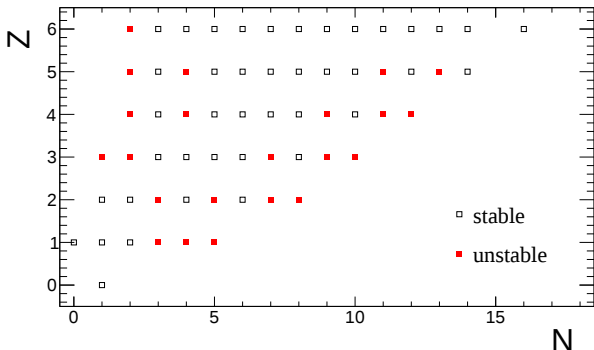


Figure: Sélection entre isotopes stables et instables en fonction du temps de demi-vie : stable si $\tau_{1/2} \geq 1e^{-6}$ s

La contribution des densités des états instables (^5He , ^5Li , ^8Be , etc) à la densité finale des états stables (détectables) est prise en compte. $n_i^{(fit)} = n_i^{(GC)} + \sum_{j \neq i} b_{j \rightarrow i} \times n_j^{(GC)}$

Implémentation de la procédure d'ajustement (III)

Pour normaliser les densités aux multiplicités expérimentales, on utilise les relations suivantes:

$$V = \frac{\tilde{A}}{\tilde{\rho}} \quad (9)$$

$$\tilde{A} = \sum_{i \in proc} A_i \times m_i^{(exp)} \quad (10)$$

$$\tilde{\rho} = \sum_{i \in proc} A_i \times n_i^{(fit)} \quad (11)$$

Finalement on applique la procédure d'ajustement à trois paramètres (T, μ_B et μ_Q) pour faire coïncider les multiplicités suivantes :

$$m_i^{(exp)} \leftrightarrow m_i^{(fit)} = n_i^{(fit)} \times V \quad (12)$$

Qualité de la reproduction (NSR)

Pour estimer la qualité de reproduction des multiplicités expérimentales par la procédure d'ajustement. On la quantifie avec la variable nommée NSR³ définie de la manière suivante :

$$NSR = 1 - \frac{\sum_{i \in proc} \left(A_i \times \delta m_i^{(fit-exp)} \right)}{\tilde{A}} \quad (13)$$

$$\delta m_i^{(fit-exp)} = |m_i^{(exp)} - m_i^{(fit)}| \quad (14)$$

$$\tilde{A} = \sum_{i \in proc} A_i \times m_i^{(exp)} \quad (15)$$

NSR=1 pour une reproduction parfaite.

³Nucleon Sharing Reproduction

Comparaison entre multiplicités expérimentales et résultats de la procédure d'ajustement : Ni+Ni

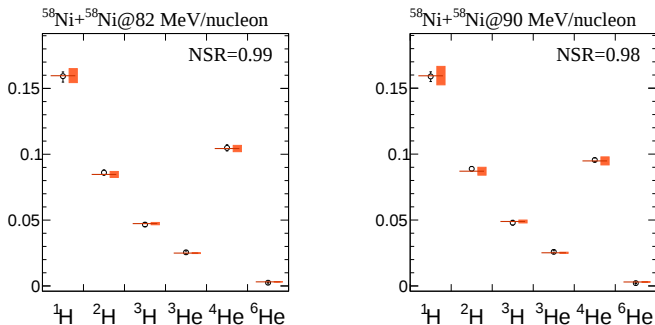


Figure: Multiplicités expérimentales (ronds ouverts noirs) et meilleures solutions de la procédure d'ajustement en orange. Les valeurs obtenues sont indiquées par les traits horizontaux, la largeur des rectangles indiquent l'exploration associée aux incertitudes sur les paramètres de l'ajustement (T , μ_B et μ_Q).

Comparaison entre multiplicités expérimentales et résultats de la procédure d'ajustement : Xe+Sn

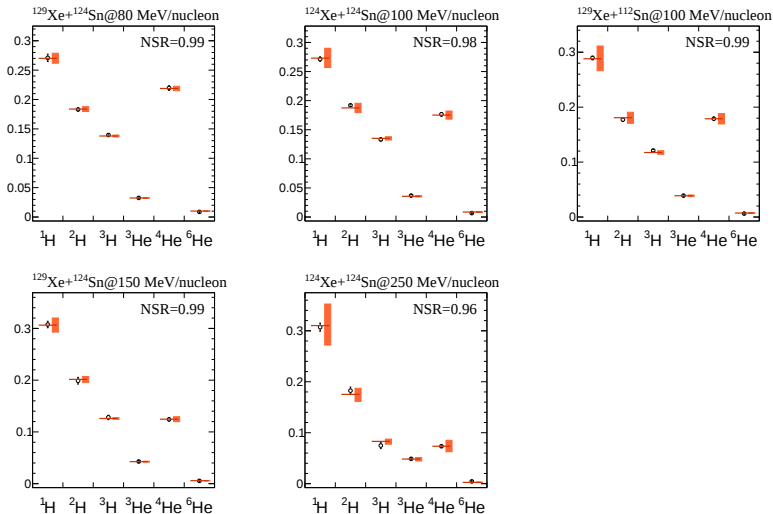


Figure: Multiplicités expérimentales (ronds ouverts noirs) et meilleures

Comparaison entre multiplicités expérimentales et résultats de la procédure d'ajustement : Au+Au

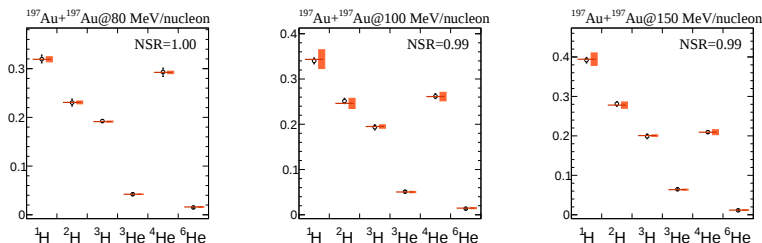


Figure: Multiplicités expérimentales (ronds ouverts noirs) et meilleures solutions de la procédure d'ajustement en orange. Les valeurs obtenues sont indiqués par les traits horizontaux, la largeur des rectangles indiquent l'exploration associée aux incertitudes sur les paramètres de l'ajustement (T , μ_B et μ_Q).

Evolution des paramètres de l'ajustement en fonction de l'énergie disponible ($E_{av}^{(CM)}$)

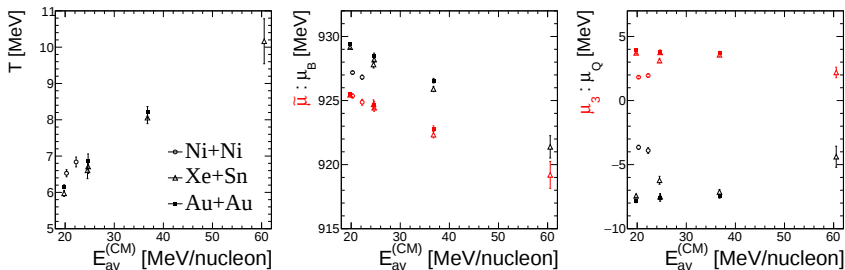
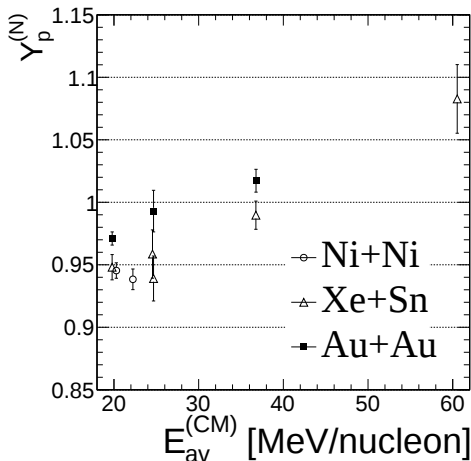


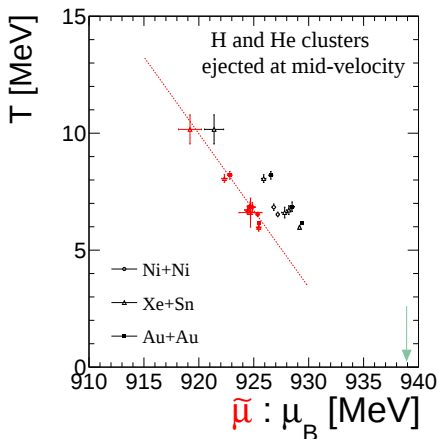
Figure: Evolution de la température et des potentiels chimiques en fonction de l'énergie disponible pour l'ensemble des solutions issues de la procédure d'ajustement.

Evolution de la fraction protonique ($Y_p^{(N)}$) en fonction de l'énergie disponible

$$Y_p^{(N)} = \frac{Y_p}{Y_p^{(reaction)}} \text{ with } Y_p = \frac{\rho Z}{\rho_B} \quad (16)$$



Corrélation entre température et potentiels chimiques extraits



Corrélation entre température et potentiels chimiques extraits

Valeurs de T et μ_B , PRC 96, 044904 (2017) - STAR Collaboration

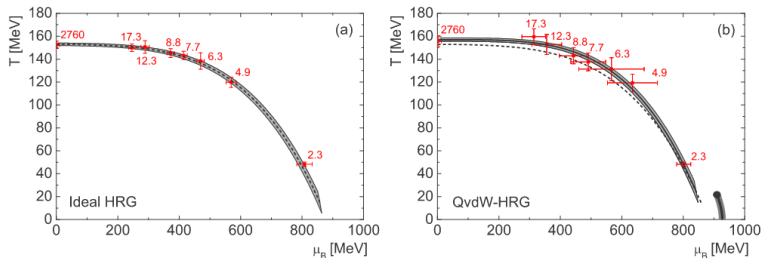


FIG. 2. Freeze-out lines according to Eq. (5) are shown in the (μ_B, T) coordinates plane all the way from collision energies $\sqrt{s_{NN}} = 1.9$ GeV to 2.8 TeV for (a) the Ideal-HRG and (b) the QvdW-HRG model. The shaded areas along the curves represent the uncertainties. The Ideal-HRG freeze-out line is represented in panel (b) by the dashed line for comparison with the QvdW-HRG curve. The numbers on the freeze-out line give the respective center-of-mass energy, $\sqrt{s_{NN}}$, in GeV. The first-order phase transition region and the nuclear critical point are also shown in panel (b) by the dark curve and the dot, respectively.

Figure: Exemple dans la littérature: PRC100, 054904

Conclusion

L'utilisation de la formulation grand canonique des densités permet de reproduire les multiplicités moyennes expérimentales des clusters émis dans le plan transverse de la réaction. Cette reproduction valide les deux hypothèses introduites précédemment:

- ▶ une seule température (T) permet de décrire les densités des clusters possiblement présents dans le milieu.
- ▶ le potentiel chimique des clusters peut se réduire à la relation mettant en jeu deux paramètres supplémentaires $\{\mu_B, \mu_Q\}$ ou $\{\tilde{\mu}, \mu_3\}$.
- ▶ Les valeurs extraites des températures et des potentiels chimiques permettent une mise en perspective avec les résultats à plus haute énergie.