

L'équation d'état de la matière nucléaire

L'équation d'état de la matière nucléaire caractérise les propriétés de la matière nucléaire soumise à des conditions extrêmes de température T , de densité ρ , et d'isospin $\delta=(N-Z)/A$. L'équation d'état conditionne la réponse collective des noyaux telle que la compressibilité des noyaux (via le module d'incompressibilité K) et les modes collectifs d'oscillations monopolaires (GMR) ou dipolaires (GDR) dans le mode isoscalaire dépendant seulement de la densité ρ , ou bien encore le mode isovectoriel via le terme d'énergie de symétrie dépendant de la densité de protons ρ_p et de neutrons ρ_n . D'autre part, la phase d'effondrement des proto-étoiles à neutron (supernova de type II) ainsi que la phase de refroidissement associée sont intimement liées à la caractérisation des paramètres de volume, de surface, coulombien et de symétrie ainsi qu'à leur dépendance en terme de densité, de température ou encore d'isospin.

Isoscaling et énergie de symétrie

L'isoscaling est une loi d'échelle qui permet de relier le coefficient de symétrie de l'équation d'état de la matière nucléaire à 2 paramètres α et β . Celle-ci s'exprime comme le rapport des taux de production $Y(Z,A)$ d'un noyau de charge Z et de masse A entre 2 systèmes différant seulement par leur isospin (rapport N/Z) en voie d'entrée soit $R_{21} = Y_2(Z,A)/Y_1(Z,A)$ qui dans le cadre de l'isoscaling peut alors s'écrire comme : $R_{21} \propto \exp(-\alpha N + \beta Z)$. La conclusion principale de l'étude menée par G. Lehaut en collaboration avec F. Gulminelli durant sa thèse a été la mise en évidence du lien entre énergie de symétrie et l'isoscaling déterminé sur le plus gros fragment de l'événement. Ceci semble indiquer que la mesure événement par événement (mesure exclusive) des caractéristiques du plus gros fragment pourra ainsi fournir des indications sur la dépendance en température ainsi qu'en densité du coefficient d'énergie de symétrie.

Transitions de phase et bimodalité

Un autre enjeu de l'étude des collisions d'ions lourds autour de l'énergie de Fermi est lié à la caractérisation des phénomènes de fragmentation des noyaux à température finie. Parmi ceux-ci, le phénomène de multifragmentation (production multiple de fragments) est considéré comme la manifestation de la transition de phase de type liquide-gaz de la matière nucléaire. L'un des signaux attendus pour la transition de phase est la bimodalité du paramètre d'ordre de la transition, qui a pu être reliée dans un cadre théorique au caractère bimodal (2 composantes) des distributions de masse et charge des fragments dans la multifragmentation. L'étude présentée dans la référence a montré que les événements formés dans les collisions périphériques entre ions lourds conduisent à un caractère bimodal des distributions du plus gros fragment et ceci en utilisant deux méthodes différentes de sélection des événements de type quasi-projectile. Ceci accrédite l'idée d'une transition de phase observée dans un tel système, transition dépendant ici de l'énergie d'excitation E^* (et donc de la température T associée). Les caractéristiques de cette transition ont ainsi été mises en évidence, notamment une détermination pour la première fois de la chaleur latente L associée à la transition liquide-gaz, qui vaut ici : $L = 8.1 \pm 0.4$ (stat.) ± 1.2 (syst.) MeV. Ces mesures ont été

obtenues grâce notamment au travail mené dans le cadre de sa thèse par Damien Mercier au laboratoire.

Production de particules chargées et diffusion en isospin

La 5e campagne de mesures effectuée avec le multidétecteur INDRA permet d'étudier l'influence de l'isospin (rapport N/Z) sur les mécanismes de production de particules et fragments dans les collisions entre ions lourds autour de l'énergie de Fermi. Dans ce cadre, le système Xe+Sn a été étudié dans la gamme d'énergie incidente comprise entre 8 et 45 MeV par nucléon. La possibilité de disposer de faisceaux de Xénon d'isospin différents, ici Xénon 124 et Xénon 136, sur des cibles isotopiquement pures, ici Étain 112 et Étain 124, autorise une telle étude. Pour les 2 systèmes de même masse totale, $^{124}\text{Xe}+^{124}\text{Sn}$ et $^{136}\text{Xe}+^{112}\text{Sn}$, les taux de production deviennent identiques pour les grandes valeurs d'énergie transverse. Ceci est relié à la diffusion en isospin entre les 2 partenaires de la collision et permet d'obtenir des contraintes pour les modèles microscopiques de transport censés décrire les réactions nucléaires dans cette gamme en énergie comme le montre la figure ci-dessous. Ce travail a été mené dans le cadre de la thèse au laboratoire de M. Kabtoul sous la direction de R. Bougault. Ceci seront complétés bientôt par les données obtenues lors de la dernière expérience INDRA-FAZIA (E789) réalisée en 2019 au GANIL. D'autre part, on peut noter qu'une partie de l'expérience INDRA-VAMOS réalisée en 2007 pourra aussi apporter des réponses quant à la mesure de la diffusion d'isospin dans les collisions centrales.

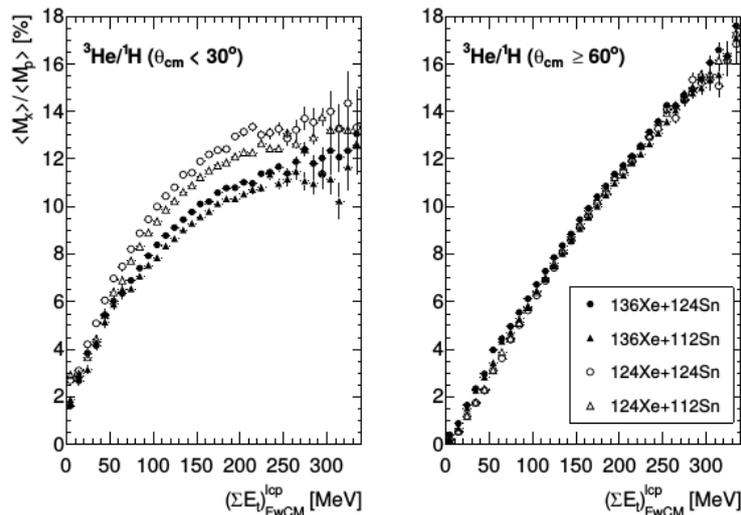


Figure 8: Taux de production relatif aux protons des Héliums 3 en fonction de l'énergie transverse (les collisions les plus centrales correspondent à une grande énergie transverse). Les 2 figures présentent l'évolution du taux de production pour des particules émises à l'avant ($<30^\circ$) et émises à mi-rapidité ($>60^\circ$). Cette figure illustre la caractère singulier des Héliums 3 émis à mi-rapidité. Extrait de R. Bougault et al., *Physical Review C* 97, 024612 (2018).

Pouvoir d'arrêt de la matière nucléaire

Le pouvoir d'arrêt de la matière nucléaire caractérise le degré de dissipation obtenu dans les collisions entre ions lourds, il est notamment important pour contraindre les modèles

microscopiques de transport mais également pour comprendre la dynamique de l'effondrement des proto-étoiles à neutron. Dans la thèse de G. Lehaut, un travail en collaboration avec D. Durand a permis de déterminer l'évolution du rapport d'isotropie en énergie R_E des événements de collisions les plus violentes sur la gamme d'énergie incidente comprise entre 10 et 100 MeV par nucléon, et pour des systèmes symétriques de taille comprise entre 72 (Ar+KCl) et 394 (Au+Au). Les conclusions de cette étude publiée en 2010 puis en 2014 montrent que l'ensemble des systèmes présentent une transition entre un régime de basse énergie ($E_{inc}/A < 30$ MeV) gouverné par le champ moyen et un régime de plus haute énergie (> 30 MeV par nucléon). Le résultat est visible sur la figure ci-dessous qui présente le libre parcours moyen d'un nucléon en fonction de son énergie incidente dans la matière nucléaire. Celui-ci présente un maximum $\lambda_{nn} \approx 10$ fm autour de l'énergie de Fermi $E_{inc} = 38$ MeV par nucléon et décroît jusqu'à la valeur de $\lambda_{nn} \approx 4$ fm au-delà de 100 MeV par nucléon. Ce comportement est lié aux effets combinés du principe d'exclusion de Pauli qui inhibe les collisions à basse énergie et les effets liés au milieu nucléaire (densité). Ceci est illustré par l'estimation de la section efficace de collision nucléon-nucléon $\sigma_{nn} = 1/\rho\lambda_{nn}$ présentée sur la même figure à droite résultant du travail de thèse de M. Henri.

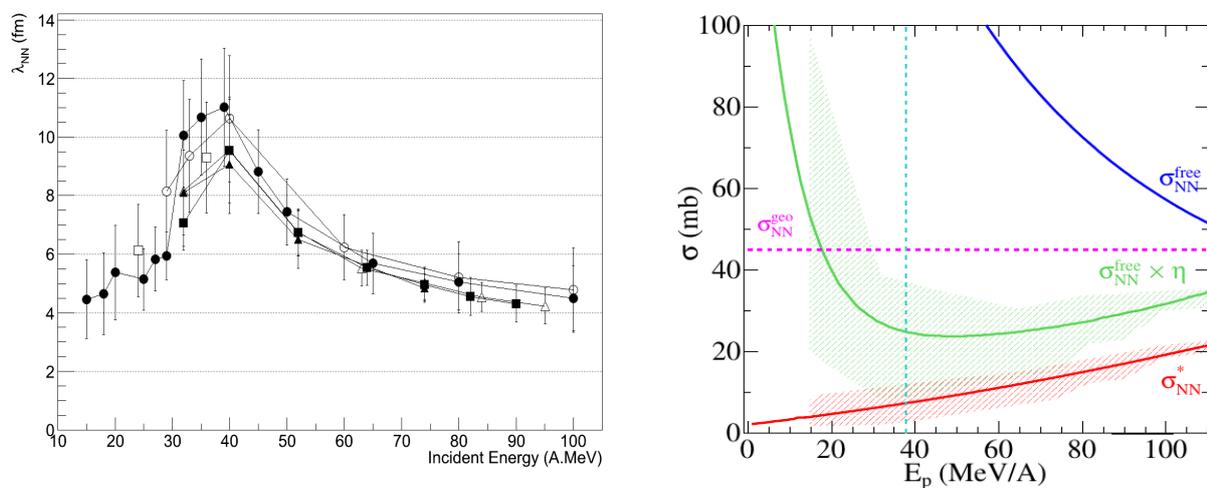


Figure 9: A gauche: libre parcours moyen d'un nucléon dans la matière nucléaire en fonction de l'énergie incidente. A droite: sections efficaces de collision entre nucléons. La courbe en bleu correspond à la section efficace dans le vide, celle en vert en tenant compte du principe d'exclusion de Pauli et celle en rouge des effets de milieu + Pauli en fonction de l'énergie incidente. Extraits de O. Lopez et al., *Physical Review C* 90, 064602 (2014) et M. Henri et al., *Physical Review C* 101, 064622 (2020).

Thermométrie et calorimétrie des noyaux chauds

Les noyaux et de manière plus générale les sources nucléaires excitées formées lors des collisions entre ions lourds autour de l'énergie de Fermi nécessitent une caractérisation précise en terme de taille, densité, énergie d'excitation et température. Ceci est en effet indispensable pour les études thermodynamiques conduisant à la caractérisation de l'équation d'état de la matière nucléaire, notamment afin de définir la courbe calorique $T=f(E^*)$. Des études ont été conduites par E. Vient et ont permis de définir précisément les meilleures techniques permettant d'exploiter les données expérimentales avec le minimum possible de biais. Ces différentes études sont présentées dans les

références : *E. Vient et al., Physical Review C 98, 044611 (2018) et 044612 (2018), European Journal of Physics A 54, 96 (2018).*

Expérience INDRA-VAMOS

Dépendance en isospin du paramètre densité de niveau pour les noyaux de masse $A=100$ et mesure expérimentale de l'énergie de symétrie à basse densité

La campagne d'expériences E494S-E503 a été réalisée de Mars à Mai 2007 au GANIL. Elle a consisté à coupler le multidétecteur INDRA avec le spectromètre à grande acceptation VAMOS installé dans la salle G1. L'objectif de la première partie de l'expérience (E494S) est de caractériser la dépendance en fonction de l'isospin (rapport neutron-proton) du paramètre densité de niveau pour des noyaux formés par réaction de fusion complète entre un noyau d'Argon et un noyau cible de Nickel à basse énergie (ici $E_{inc}=13$ MeV/nucléon). Différentes combinaisons de projectiles (Argon 34, 36, 40) et cibles (Nickel 58, 60 et 64) permettent alors de former des noyaux de Palladium ($Z=46$) excités de masse comprise entre 92 et 104. L'énergie d'excitation est ici modérée, de l'ordre de 3 MeV par nucléon et la principale voie de décroissance est alors ici l'évaporation de particules légères. Ainsi, par la mesure (Z , A et énergie) des particules légères chargées avec INDRA et la mesure précise (Z , A et vitesse) des résidus d'évaporation avec VAMOS, nous allons pouvoir déterminer, à l'aide de modèles statistiques décrivant l'évaporation, la dépendance du paramètre densité de niveau a , qui intervient notamment dans la relation entre énergie d'excitation E^* et température T par la relation : $E^*=aT^2$. Les données, récoltées sur des noyaux exotiques de masse autour de 100 unités, n'ont jamais été réalisées dans des conditions expérimentales aussi exclusives (détection simultanée du résidu et des particules légères chargées). Nous pensons ainsi apporter des informations concernant la dépendance de a en fonction de l'isospin $I=(N-Z)/A$; ceci est nécessaire pour permettre aux modèles statistiques de décrire correctement l'évaporation de noyaux exotiques loin de la vallée de stabilité. Dans le cadre du programme expérimental plus vaste lié à la poursuite des études thermodynamiques sur les noyaux chauds auprès des nouveaux accélérateurs produisant des faisceaux exotiques comme SPIRAL2 ou dans le futur plus lointain EURISOL, la connaissance de la dépendance en isospin du paramètre densité de niveau s'avère en effet indispensable. La seconde partie de l'expérience (E503) concerne des faisceaux de $^{40,48}\text{Ca}$ à 35A MeV sur des cibles de $^{40,48}\text{Ca}$. Par la mesure croisée des caractéristiques des produits de réaction provenant des différentes combinaisons de ces systèmes, il est alors possible de mesurer précisément la diffusion d'isospin (diffusion neutron-proton) dans les collisions dissipatives et notamment centrales. En effet, pour ce type de collisions, des sources nucléaires sont formées à basse densité (par rapport à la densité de saturation) et permettent alors de sonder la dépendance à basse densité de la part isovectorielle de l'équation d'état pour laquelle de grandes incertitudes existent. Ceci se place donc en droite ligne des études déjà entamées sur ce sujet (cf. paragraphe sur la diffusion de l'isospin).



Figure 10: Montage INDRA-VAMOS dans la salle G1 du GANIL. INDRA est ici au premier plan et le spectromètre magnétique VAMOS se situe derrière en rose.

FAZIA, un détecteur de nouvelle génération pour l'équation d'état

Dans le futur, les machines de faisceaux radioactifs (SPIRAL2/GANIL, SPES/LNL, EURISOL) délivreront des faisceaux très exotiques adaptés pour étudier le degré de liberté en isospin (rapport N/Z) de l'équation d'état du noyau. Pour ce faire, il sera nécessaire d'obtenir une identification étendue (Z et A) des produits de réaction qui n'est pas réalisée aujourd'hui. Le LPC Caen faisant partie de la collaboration INDRA-FAZIA est engagé depuis une quinzaine d'années dans une collaboration internationale dont l'objectif est de construire un détecteur de nouvelle génération FAZIA possédant une identification étendue par discrimination en forme des signaux numérisés de courant et de charge issus de l'interaction des ions avec des détecteurs siliciums et CsI(Tl). Ce travail a été soutenu par l'Agence Nationale de la Recherche de décembre 2005 à juin 2008 (ANR-05-BLAN-0373-01) et s'insère dans une collaboration officielle depuis 2006 (<http://fazia2.in2p3.fr/spip/>) qui regroupe des physicien(ne)s, ingénieurs et technicien(ne)s de France, Italie, Pologne, Espagne, Corée du sud et Roumanie. La phase de *R&D* a été encouragée par le conseil scientifique de l'IN2P3 en 2007. FAZIA fait partie des nouveaux multidétecteurs pour SPIRAL2 (Lettre d'Intention 18 [13]) et est soutenue par le FP7-Infrastructure SPIRAL2 Preparatory Phase (W.P. 5.3). Un *Memorandum of Understanding (MoU)* a été signé par les différents partenaires en 2010 et renouvelé en 2018 pour la phase FAZIA - démonstrateur.

Dans le projet FAZIA, le LPC Caen a été essentiellement impliqué dans la réalisation des expériences, l'Analyse en Forme des signaux, la mécanique, les simulations d'expériences [16], l'étude des détecteurs CsI(Tl) et la gestion de la collaboration. Parallèlement, des études théoriques des impulsions de courants induits par les ions lourds dans les détecteurs de silicium sont menées avec l'EJCLab. La phase I de FAZIA est désormais réalisée techniquement à 100%.

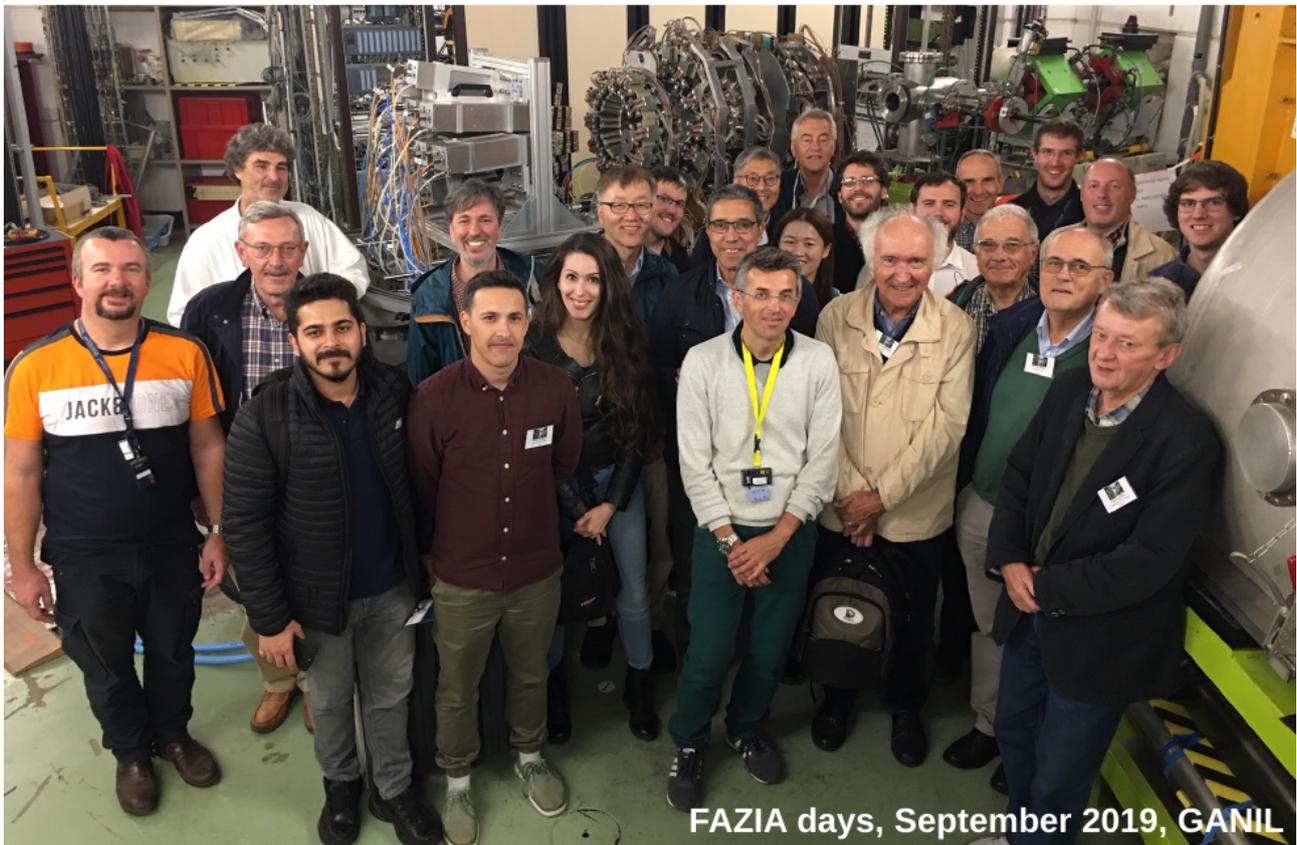


Figure 11: Une partie de la collaboration INDRA-FAZIA dans la salle D5 au GANIL. A l'arrière-plan sont visibles les détecteurs FAZIA (gauche) et INDRA (droite).

L'expérience E789 réalisée au GANIL en mai 2019 a permis d'entamer la phase d'exploitation du multidétecteur (phase 2). La qualité de l'identification (A , Z) obtenue dépasse, à notre connaissance, tout ce qui avait été fait jusqu'alors avec ce type de détecteurs. Cette deuxième phase « démonstrateur » permettra à la collaboration FAZIA d'effectuer des mesures dans le cadre d'un programme scientifique défini auprès des installations existantes en Italie et en France basé sur des simulations effectuées dans le cadre de la collaboration. Le projet a été récemment financé par la région Normandie dans le cadre du Réseau d'Innovations Normandes (*RIN*) FIDNEOS à hauteur de 300 k€ pour la période 2018-2022. Ceci a permis de finir la réalisation de l'ensemble du démonstrateur FAZIA (12 blocs de 16 télescopes) afin de le coupler avec le multidétecteur existant INDRA au GANIL pour la première fois en 2019. D'autres expériences sont ainsi prévues dans l'avenir, toujours au GANIL, dans la période 2021-2025, notamment en ce qui concerne la problématique de la production des clusters (noyaux légers $A < 15$) dans le milieu nucléaire dilué et chaud. Ceci est d'une importance cruciale pour décrire la phase d'effondrement du cœur des supernovæ et la dynamique de refroidissement conduisant à la formation des étoiles à neutrons. Ces études sont en effet à mettre en corollaire avec les récentes observations d'événements de fusion entre étoiles à neutrons grâce à la détection d'ondes gravitationnelles par les interféromètres LIGO et VIRGO depuis 2015, ainsi que les observations faites depuis 2018 par le spectroscopie à rayons X NICER embarqué sur la station spatiale internationale.