

Synthèse des réflexions du groupe « Réactions Nucléaires »

C.-O. Bacri, M. Chevallier, D. Dauvergne, J.-E. Ducret, F. Rejmund, C. Volant

Motivations

Les études des mécanismes qui gouvernent les réactions nucléaires sont un sujet de recherche en soi puisqu'elles permettent de comprendre la dynamique des collisions nucléaires qui forment les noyaux, dans différents états d'excitation. Elles permettent ainsi d'accéder à leurs propriétés macroscopiques telles que, par exemple, l'émission de fragments en fonction de l'énergie d'excitation et l'isospin, les barrières de fission sur une large gamme d'isospin, les temps de fission, la viscosité de la matière nucléaire et, enfin, l'influence de la structure en couches sur ces grandeurs.

L'étude de l'évolution des caractéristiques fondamentales du noyau permet d'extrapoler le comportement du noyau loin de la stabilité. Ceci a des implications sur la compréhension de la stabilisation des super - lourds, l'apparition de nouvelles couches, l'influence de l'interaction proton- neutron...

Des progrès très importants sur ces sujets ont été obtenus récemment, notamment par la mesure en cinématique inverse des distributions isotopiques des résidus de réactions de spallation, de fragmentation et de fission induite par interaction électromagnétique ou nucléaire ainsi que la mesure de leurs propriétés cinématiques auprès du séparateur de fragments FRS, au GSI- Darmstadt. Cette méthode a notamment et par exemple permis la découverte du noyau doublement magique ^{78}Ni . Le principe fondateur de ces expériences est de combiner la cinématique inverse à un séparateur suffisamment puissant pour pouvoir séparer et identifier des résidus lourds jusqu'à l'uranium. La cinématique inverse permet de s'affranchir des effets de seuil. La séparation des fragments permet leur identification avec une très grande résolution et permet de mesurer avec une bonne précision les sections efficaces isotopiques. Les propriétés cinématiques, mesurées à l'aide de la déflexion magnétique dans le séparateur, sont obtenues avec une précision meilleure de plus d'un ordre de grandeur par rapport aux techniques de temps de vol. Ces mesures de la spallation, dont certaines furent réalisées avec la participation d'astrophysiciens spécialisés dans l'étude des rayonnements cosmiques font suite à d'autres expériences réalisées au laboratoire national Saturne (LNS).

Nous proposons d'approfondir ces études reposant sur le principe de la cinématique inverse en détectant dans l'état final non seulement le fragment lourd mais aussi les particules légères, neutrons, protons et composites en coïncidence avec les fragments lourds. Ceci permettra, en accroissant l'exclusivité de la mesure, de mieux caractériser les différentes voies de réaction et, en particulier, d'être plus sensible au noyau composé issu de la cascade intra- nucléaire. De telles mesures ne sont réalisées dans aucun laboratoire au monde actuellement, tout au moins pour des études de spallation. La collaboration EOS à Berkeley a fait de telles expériences sur les collisions noyau- noyau en détectant les particules chargées dans l'état final mais a abandonné le domaine depuis. La collaboration ALADIN de GSI étudie la désexcitation du projectile dans les collisions noyau - noyau avec détection des fragments chargés. Ces expériences se concentrent sur les collisions centrales par sélection, au niveau du trigger d'acquisition de ces collisions et ne sont donc pas sensibles à l'ensemble de la section efficace. De plus, la détection n'est efficace que pour les fragments de charges au moins 2, ce qui laisse de côté une partie importante des produits d'évaporation. La collaboration INDRA à GANIL, Caen, effectue aussi des mesures exclusives sur des collisions noyau - noyau, mais ces travaux sont réalisées à plus faible énergie ($< 100 \text{ MeV/u}$), et pour étudier la thermodynamique du noyau. Les distributions isotopiques permettent de déterminer

les chemins de désexcitation des noyaux chauds et, dans une certaine mesure, l'énergie d'excitation maximale transmise lors de la collision. Les distributions en vitesse des fragments permettent de différencier les différents mécanismes de production, évaporation, réactions inélastiques, formation de clusters et fission. L'interprétation des résultats nécessite une description précise des barrières coulombiennes, des probabilités de fission, de la formation de particules composites, des densités d'états, de l'influence des couches et des états collectifs. Toutefois, cette interprétation repose sur une modélisation des voies d'entrée, notamment sur les distributions isotopiques des pré- fragments ainsi que des distributions en énergie d'excitation, très larges dans le cas de réactions de fragmentation ou de spallation. Ces nouvelles mesures exclusives lèveront ces hypothèses puisqu'elles permettront la reconstruction des caractéristiques des pré- fragments.

Thèmes de physique abordés :

- formation des noyaux chauds par différentes méthodes, pour étudier les effets de voies d'entrée,
- caractérisation des noyaux chauds, calorimétrie, mesure de la cinématique complète,
- étude des modes de désexcitation des noyaux chauds : effets de structure, fluctuations paires/impaires dans les résidus légers, survie des résidus d'évaporation lourds, distribution des fragments de fission, formation de particules composites,
- barrières de fission et barrières d'émission des nucléons ; désexcitation de noyaux formés près de la drip- line proton,
- viscosité de la matière nucléaire, temps de fission caractéristiques du couplage entre la dissipation, la déformation du noyau et les degrés de liberté des particules individuelles, survie des résidus d'évaporation lourds à la fission.

Démarches expérimentales

L'essentiel des avancées réalisées ces dernières années vient d'un effort de notre communauté pour corréler entre eux les différents résultats expérimentaux issus d'expériences inclusives. Cela a permis d'avoir une vue, la plus globale possible des réactions étudiées. L'étape suivante consiste maintenant à essayer de faire des mesures les plus exclusives possibles, afin d'avoir un accès direct aux différentes corrélations et ainsi de minimiser les biais expérimentaux.

Différentes perturbations du noyau sont envisagées : le dépôt d'énergie dans le noyau, le moment angulaire créé dans les réactions entre noyaux, la déformation des noyaux ou encore la dépendance de ces grandeurs en fonction de l'isospin du projectile et de la cible. Les observables expérimentales d'intérêt sont : la distribution des produits de fission et des particules composites (angle et énergie), le temps de survie des résidus d'évaporation, les sections efficaces des différentes voies de désexcitation...

L'idée fondamentale de la démarche expérimentale est double : 1) faire varier les différents types de perturbations du noyau indépendamment les uns des autres afin de mieux comprendre leur influence sur les observables ; 2) mesurer les voies de sortie des réactions, liées à la désexcitation des noyaux composés, avec une grande résolution isotopique et énergétique, afin de reconstruire le plus complètement possible la cinématique de la réaction. Ceci conduira à la réalisation d'expériences de plus en plus exclusives.

1) Réactions nucléaires étudiées

Les réactions de spallation sont des réactions qui permettent de chauffer le noyau à haute température, sans composante collective et à faible moment angulaire. Les

réactions directes privilégient les faibles énergies d'excitation et les faibles moments angulaires et les réactions de fusion correspondent à des domaines d'énergie d'excitation bien définis mais à de larges gammes de moment angulaire.

Afin de bien comprendre les observables expérimentales, il est important de maîtriser au mieux les perturbations induites dans le noyau par le projectile. Pour déterminer l'énergie d'excitation, il est possible d'utiliser des méthodes de calorimétrie en cinématique inverse. Dans le cas des réactions de transfert, par exemple (d,p) à basse énergie et toujours en cinématique inverse, la mesure des caractéristiques cinématiques du partenaire de transfert est envisagée.

Pour les systèmes lourds, la détermination du moment angulaire peut se faire par la mesure des distributions angulaires des produits de fission. L'utilisation de faisceaux exotiques, en plus de rendre possible l'étude de l'influence de l'isospin sur les barrières de fission, les énergies de liaison et la distribution des produits de fission, permet également l'étude des systèmes composés similaires mais produits par différentes réactions dont nous mesurerons l'influence sur les voies de sortie. Ainsi, l'influence du moment angulaire sur les voies de sortie peut être étudiée en comparant les résultats des réactions (d,p) et de fusion pour un noyau composé identique et correctement caractérisé dans chacune des deux réactions.

L'évolution de l'énergie potentielle du noyau et des fermetures de couche en fonction de la déformation peut être étudiée par la mesure de barrières de fission induite par réaction de transfert. L'émission de particules composites constitue une voie de désexcitation qui apparaît dans les réactions de spallation comme dans les réactions de fusion. Ce phénomène est directement lié à l'évolution du potentiel nucléaire avec la déformation et l'énergie d'excitation. Il est de plus accompagné de fluctuations pair - impair importantes et persistant aux énergies relativistes. Étudier ce phénomène sur une large gamme de noyaux et d'énergie donnera des informations sur les forces d'appariement proton-neutron et sur le gap d'appariement proche de la drip-line. Une extension possible des mesures de spallation (proton + noyau) serait de mesurer les réactions « ion léger ($d, {}^3/4\text{He}$) + ion lourd » dans lesquelles la production de fragments légers et de masse intermédiaire est plus importante que dans la spallation, ce qui permettrait d'étudier la naissance de ce phénomène comme voie de désexcitation. De telles mesures, en cinématique directe, furent réalisées au LNS et aux AGS de Brookhaven mais n'ont pu que très rarement caractériser les fragments les plus lourds. Prédire les distributions et les caractéristiques cinématiques des particules composites ou des fragments de fission en fonction des différentes contraintes appliquées au noyau est un enjeu majeur pour la compréhension des forces qui règlent la cohésion de la matière nucléaire. La distribution des fragments de fission dans les réactions induites par des faisceaux exotiques en cinématique inverse, offre une opportunité unique pour mesurer l'influence des effets de couches sur les chemins de déformation qui mènent à la fission à faible énergie.

2) Mesure des voies de sortie

Les expériences à basse ou haute énergie que nous envisageons reposent sur la mesure en coïncidence des fragments lourds et légers en cinématique inverse (pour s'affranchir des effets de seuil de détection) événement par événement dans des détecteurs permettant l'identification de traces multiples.

À GSI, le projet R³B décrit l'installation expérimentale nécessaire à la réalisation de ces expériences à des énergies autour de 1 A.GeV. L'aimant de grande acceptance GLAD y est couplé à un système permettant la détection des photons au point cible et la détermination des traces des particules (particules chargées et neutrons) à la cible comme en aval de l'aimant. À plus basse énergie, la compétition des voies de désexcitation peut être mesurée au GANIL avec un détecteur de type INDRA ou AZ4 π

couplé au spectromètre VAMOS, complété lui aussi par un système de traçage des particules.

Les temps de fission peuvent être mesurés par des techniques transdisciplinaires telles que le blocage cristallin ou la spectroscopie X des noyaux composés. Ces techniques seront utilisées dans le futur au GANIL (et éventuellement au GSI). Dans la continuité de ces expériences, la canalisation d'ions lourds permettra aussi de réaliser pour la première fois l'excitation résonante cohérente de transitions dans les noyaux. Les distributions isotopiques des résidus de noyaux chauds ayant survécu à la fission dépendent également des temps de fission. Elles peuvent être mesurées dans les deux systèmes complexes de traçage et d'identification ci-dessus mentionnés, au GANIL et au GSI, ce qui permet d'étudier l'influence de l'énergie d'excitation sur les temps de fission. La mesure en coïncidence de l'émission de particules composites peut être envisagée à basse et à haute énergie pour pouvoir étudier l'influence de l'énergie d'excitation.

Dans les deux laboratoires, GANIL & GSI, l'utilisation de faisceaux exotiques est incontournable pour étudier la stabilité des noyaux et l'évolution des probabilités de fission avec l'isospin. Les deux laboratoires fourniront des faisceaux radioactifs dont la complémentarité est indiscutable. La fragmentation des faisceaux relativistes d'uranium permettra d'étudier les réactions avec des noyaux fissiles légers et déficients en neutrons.

Une synergie très forte se dégage donc, pour les études des réactions nucléaires entre GSI/FAIR (**F**acility for **A**ntiproton and **I**on **R**esearch), GANIL/SPIRAL1-2 et EURISOL. Les expériences menées auprès de ces deux machines profiteront de la grande complémentarité des gammes d'isospin et d'énergie disponibles dans les deux laboratoires. De plus, les différentes réactions nucléaires permettront de déterminer l'influence des mécanismes de réaction sur les voies de sortie. Ceci est fondamental pour contraindre les modèles dynamiques ou statistiques pour la description de la désexcitation du noyau chaud.

La participation des physiciens dans la préparation de ces expériences est de trois niveaux. Premièrement, les physiciens sont impliqués dans la conception de l'aimant GLAD qui sera installé à GSI. GLAD est ainsi optimisé pour tout un ensemble d'expériences de physique. Deuxièmement, l'utilisation de la cinématique inverse oblige à concevoir des détecteurs multi-trace et permettant de mesurer efficacement aussi bien les fragments lourds que les particules légères en identifiant par intégration des pertes d'énergie la charge de ces fragments trace par trace. Un tel schéma de détection nécessite l'échantillonnage des trajectoires et donc l'utilisation de flash-ADCs de grande dynamique de signal primaire et de haute résolution. Troisièmement, les expérimentateurs sont aussi impliqués dans les travaux de simulation rendus nécessaires par ces expériences complexes : au niveau de la modélisation théorique des réactions (cascade intranucléaire, modèles de désexcitation), ce qui permet de mieux concevoir les expériences et les observables pertinentes comme au niveau de la simulation des détecteurs eux-mêmes dans le but d'optimiser ces expériences, complexes, dans des espaces des phases multidimensionnels. Les moyens financiers et humains nécessaires pour mener à bien ce programme sont à la hauteur de la complexité des expériences. Le détecteur multi-trace actuellement à l'étude au DAPNIA est estimé à environ 1 M€. Une collaboration, côté français, d'une dizaine de permanents est nécessaire. Pour les expériences au GANIL envisagées pour ce programme, un investissement de 1M€ est à prévoir, avec cinq permanents supplémentaires. Enfin, pour les expériences de canalisation/blocage d'ions lourds dans les cristaux, sept permanents sont impliqués et leur réalisation au futur GSI exigera la construction d'une chambre à réaction spéciale. Ces programmes expérimentaux se situent non seulement dans une collaboration étroite entre le DAPNIA et l'IN2P3 mais aussi dans un cadre européen.

Ainsi, la collaboration R³B regroupe plus de 40 institutions d'une dizaine de pays européens et des États-Unis.

La complémentarité et la synergie qui existeront entre les installations de SPIRAL et de GSI exigeront une coordination forte de l'effort français dans le thème de physique des mécanismes de réaction. Une telle coordination permettra une meilleure visibilité des études réalisées dans ce domaine, études qui concernent tout un ensemble de thèmes de physique, de la synthèse des noyaux super-lourds aux réacteurs hybrides incinérateurs d'actinides. Les expériences à venir dans ce domaine seront très exclusives (plusieurs particules dans l'état final) pour pouvoir précisément reconstruire les cinématiques de réaction. Elles nécessiteront l'emploi de techniques de pointe (électronique de lecture à haute résolution, canalisation d'ions lourds) et exigeront de gros moyens, en investissements comme en physiciens, sur les dix prochaines années. Il est cependant nécessaire de noter que les collaborations sur les expériences qui se dérouleront auprès de la future installation de GSI sont en cours de montage. Aussi est-il important que les physiciens français soient rapidement présents et visibles sur ce projet.

Conclusion

Les études des mécanismes qui gouvernent les réactions nucléaires permettent, grâce à une bonne compréhension de la dynamique de la collision, d'accéder aux propriétés macroscopiques du noyau, et ainsi de mieux extrapoler son comportement loin de la stabilité. Ceci a des implications sur la compréhension de la stabilisation des super - lourds, l'apparition de nouvelles couches, l'influence de l'interaction proton - neutron... Les thèmes développés sont proches de ceux des sous-groupes « Noyaux lourds et super - lourds » et « Matière, noyaux, transport et transition ». En plus des avancées possibles dans la compréhension des forces de cohésion du noyau et de la description de la densité d'états, ce programme a des applications directes. Une forte synergie existe donc avec les objectifs du groupe de réflexion « physique et chimie pour le "nucléaire" et l'environnement » (sous-groupe XADS/Spallation).

Nous proposons de systématiser la technique de la cinématique inverse en accroissant le degré d'exclusivité caractérisant les états finaux des réactions étudiées afin d'augmenter grandement la sensibilité des observables aux modèles théoriques. En particulier, la distinction entre particules émises dans la phase initiale de dépôt d'énergie dans le noyau et les particules de la phase d'évaporation/désexcitation est bien marquée dans ces expériences. Dans l'étude de la fission, de telles mesures seront complétées par des expériences de blocage cristallin et de spectroscopie X qui donnent un accès plus direct aux temps longs de désexcitation des noyaux composés.

De telles expériences seront réalisées dans le cadre de collaborations internationales à GSI ou à GANIL, nécessiteront des développements techniques tout à fait spécifiques et permettront la mise en œuvre d'un programme scientifique d'une grande cohérence qui rendra possible des avancées majeures dans la compréhension des mécanismes des réactions nucléaires.