

Synthèse des réflexions du groupe « Réactions Nucléaires »

Motivations

Le but de ce groupe de travail est d'examiner l'avenir des études des mécanismes qui gouvernent les réactions nucléaires. Ces études permettent en effet d'accéder aux propriétés macroscopiques du noyau telles que, par exemple, l'émission de fragments avec 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.

Ces études permettent de projeter le comportement du noyau loin de la stabilité. Cela a des conséquences 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 superlourds » et « Matière, noyaux, transport et transition ». Pour ce second groupe, en effet, une meilleure compréhension des mécanismes élémentaires permettra de mieux appréhender les effets collectifs à l'œuvre dans les collisions d'ions lourds. 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. En effet, la maîtrise quantitative des distributions isotopiques des résidus de spallation et des produits de fission d'actinides mineurs permet des simulations précises de la radiotoxicité et des flux de neutrons dans les sources de spallation (sous-groupe XADS/Spallation). Une forte synergie existe donc avec les objectifs du groupe de réflexion « physique et chimie pour le "nucléaire" et l'environnement ». De plus, la compréhension des mécanismes de réaction sur une grande gamme d'énergie permet de maîtriser les taux de production des faisceaux radioactifs, et a des implications fortes dans les projets nationaux (SPIRAL2) comme internationaux (FAIR@GSI, Facility for Antiproton and Ion Research, EURISOL).

Thèmes de physique soulevés :

- 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, survie des résidus d'évaporation lourds à la fission, blocage cristallin.

Démarches expérimentales

Différents méthodes sont envisagés : 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 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 mieux 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) , la mesure de la cinématique 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.

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 est plus importante que dans la spallation, ce qui permettrait d'étudier la naissance de ce phénomène comme voie de désexcitation. Prédire les distributions et les caractéristiques cinématiques des fragments ou produits 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 une technique : la cinématique inverse associée à un spectromètre. La cinématique inverse permet en effet une meilleure détection des produits de réaction, sans problème de seuil et avec une meilleure résolution. L'utilisation de spectromètre permet une identification en masse et en énergie cinétique d'une résolution difficilement égalable par les détecteurs. La détection en coïncidence des fragments

lourds et légers est possible événement par événement dans des détecteurs permettant l'identification de traces multiples dans chaque événement. De plus, dans cette technique de mesure, l'identification isotopique des fragments est basée sur une analyse spectrométrique précise et permet d'obtenir de bonnes résolutions. À GSI, le projet R³B décrit l'installation expérimentale nécessaire à la réalisation de ces expériences à des énergies supérieures à 100 A.MeV. 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 longs sont caractéristiques du couplage entre la déformation du noyau et les degrés de liberté des particules individuelles. Ils peuvent être mesurés par blocage cristallin ou par la mesure du temps de survie des noyaux chauds à la fission. Dans ces expériences, les noyaux excités sont thermalisés et les temps de fission ne dépendent plus que des barrières de fission. Les techniques de blocage cristallin qui combinent physique nucléaire et physique atomique seront utilisées dans le futur au GANIL et au GSI où des faisceaux hydrogénoïdes sont disponibles. Elles permettront aussi de réaliser pour la première fois une excitation résonnante des transitions isomériques 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 relativiste de faisceaux d'uranium permettra d'étudier les réactions avec des noyaux fissiles légers et déficients en neutrons. Les faisceaux de basse énergie riches en neutrons de SPIRAL2 permettront de créer et d'étudier en vol pour la première fois la fission d'actinides riches en neutrons.

Une synergie très forte se dégage donc, pour les études des réactions nucléaires entre GSI/FAIR et GANIL/SPIRAL1-2. Les expériences menées auprès de ces deux machines apporteront des résultats très complémentaires. Les gammes en isospin disponibles dans les deux laboratoires sont complémentaires, mais également les différences de réactions nucléaires permettront de déterminer l'influence du mécanisme de réaction sur les voies de sortie. Ce point est fondamental pour déterminer les modèles dynamiques ou statistiques pour la description de la désexcitation du noyau chaud.

L'implication 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 (14 bits) 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, ce qui permet d'optimiser ces expériences, complexes, dans des espaces des phases multi-dimensionnels. 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 d'ions lourds dans les cristaux, sept permanents sont impliqués et leur réalisation au GSI exigera la construction d'une chambre à réaction spéciale. Ces programmes expérimentaux se situent non seulement dans un cadre de 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.