

Structure et dynamique nucléaire

(15 décembre 2004)

Prospective à dix ans DSM/DAPNIA - IN2P3

Personnes ayant participé à la réflexion :

A. Astier, F. Auger, F. Azaiez, C.O. Bacri, G. Ban, K. Bennaceur, B. Blank, Y. Blumenfeld, D. Boilley, B. Borderie, A. Boudard, R. Bougault, B. Bourriquet, C. Canchel, J. Carbonel, A. Chbihi, M. Chevallier, P. Chomaz, D. Curien, D. Dauvergne, J.C. David, R. Dayras, G. de France, J.P. Delaroche, P. Dessagne, O. Dorveaux, A. Drouart, J.E. Ducret, J. Dudek, T. Duguet, D. Durand, X. Fléchar, J. Frankland, B. Gall, A. Gillibert, J. Giovinazzo, A. Goeregn, D. Guinet, F. Gulminelli, F. Hannachi, K. Hauschild, C. Jollet, E. Khan, A. Korichi, W. Korten, V. Lapoux, P. Loutesse, F. Le Blanc, N. Le Neindre, D. Lacroix, S. Leray, E. Liénard, O. Lopez, A. Lopez-Martens, D. Lunney, F. Maréchal, J. Margueron, F. Mauger, J. Meyer, M. Morjean, W. Mittig, L. Nalpas, O. Naviliat-Cuncic, N. Orr, M. Parlog, J. Péter, E. Pollacco, N. Redon, F. Rejmund, M.F. Rivet, M. Rousseau, P. Roussel-Chomaz, B. Roussière, J. Sauvagne, H. Savajols, P. Schuck, C. Simenel, C. Stodel, L. Stuttgé, B. Tamain, C. Theisen, C. Thibault, N. Van Giai, P. Van Isacker, A. Villari, C. Volant, C. Volpe, J.P. Wieleczko.

Correspondants du groupe :

F. Auger, Y. Blumenfeld, P. Chomaz

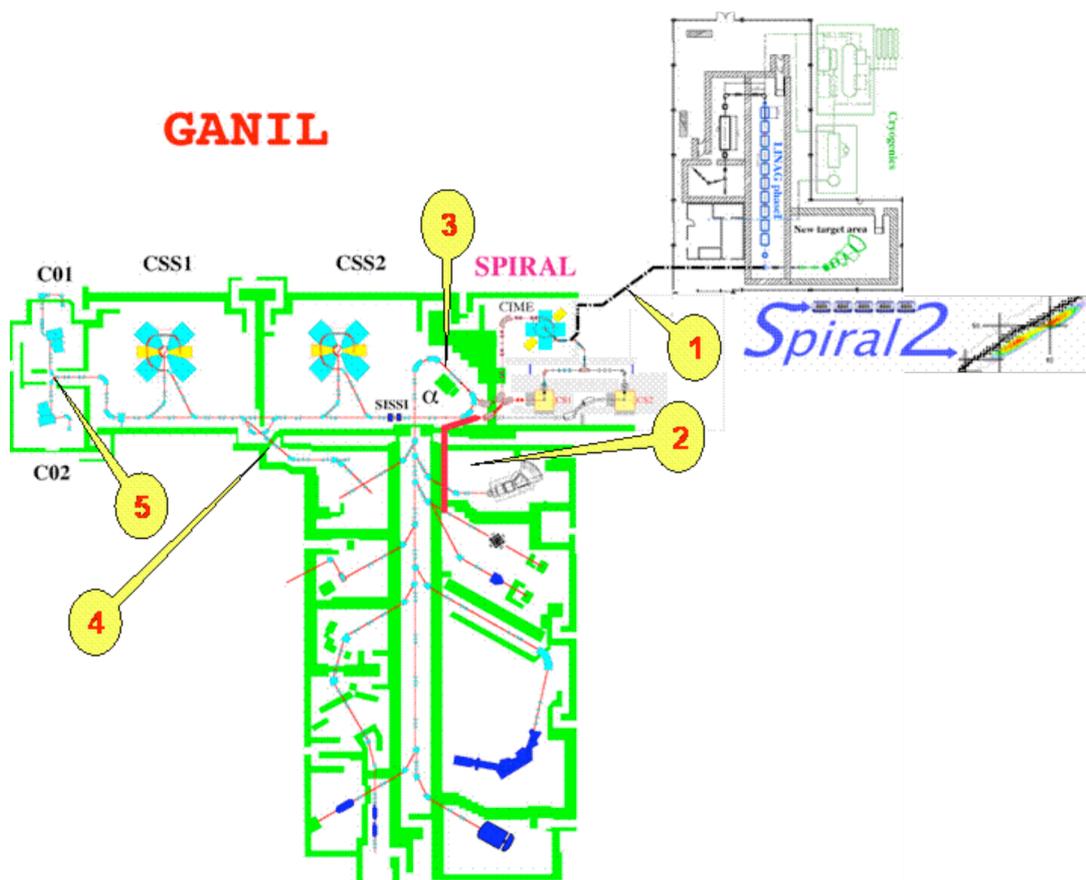
Responsables du document :

R. Bougault, W. Korten

Responsables des sous-groupes :

- *Théorie* : N. Van Giai, P. Van Isacker
- *Structure vers les drip-lines* : F. Azaiez, J. Giovinazzo, P. Roussel-Chomaz
- *Collectivité, formes et appariements* : J. Dudek, W. Korten, N. Redon
- *Matière, noyaux, transport et transition* : A. Chbihi, O. Lopez, J.P. Wieleczko
- *Noyaux lourds et super-lourds* : A. Drouart, C. Stodel, L. Stuttgé
- *Réactions nucléaires* : J. E. Ducret, F. Rejmund
- *Interactions fondamentales* : D. Lunney, O. Naviliat-Cuncic
- *Nouvelles sondes* : F. Hannachi, C. Volpe

GANIL/SPIRAL-2 (2009) : une installation « multi-faisceaux » pour la physique européenne



Exemple de 5 faisceaux en parallèles :

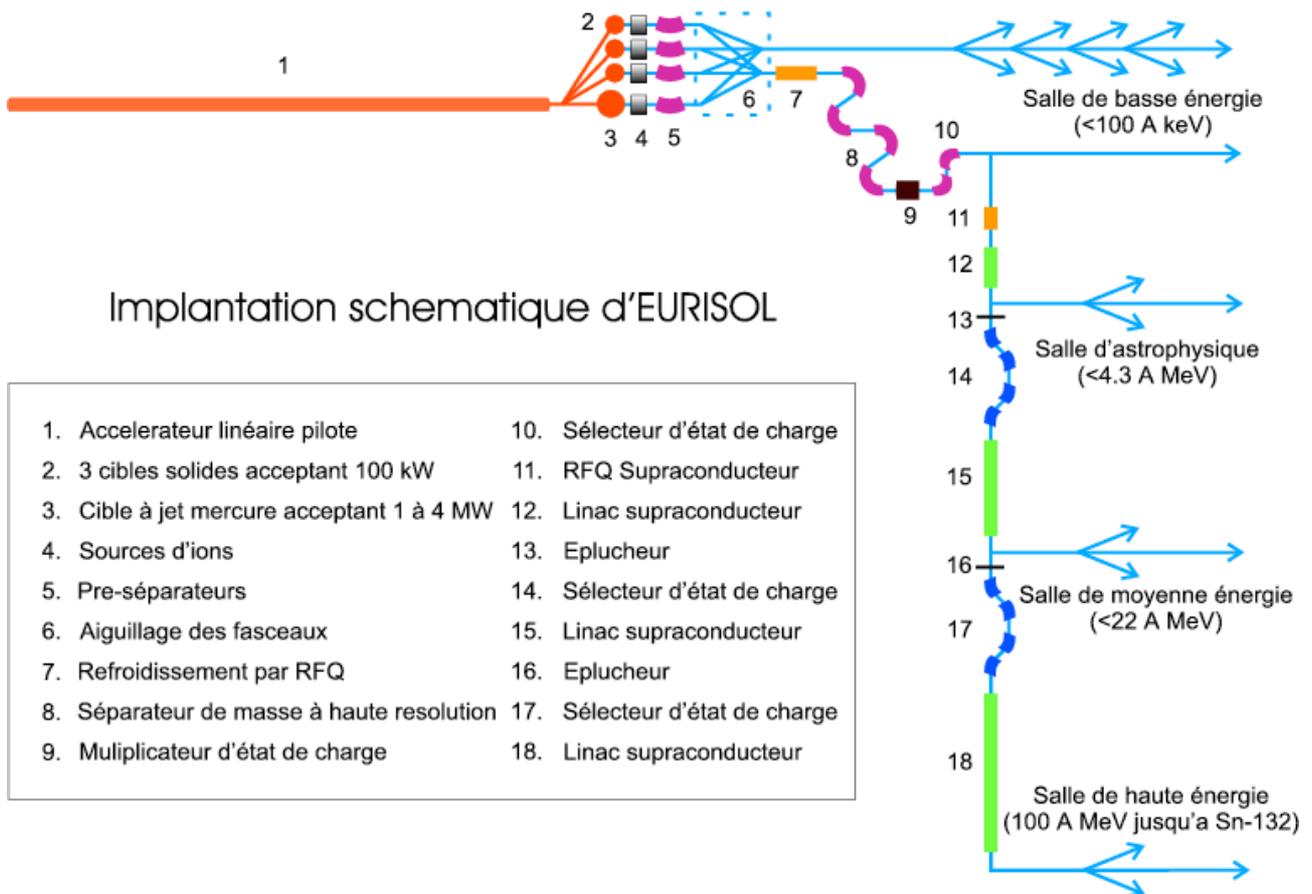
SPIRAL-2 : 40 MeV deutons et production des fragments de fission

- 1) RIB de basse énergie (LIRAT)**
- 2) RIB à 6 A.MeV de CIME vers VAMOS ou EXOGAM**

GANIL Standard

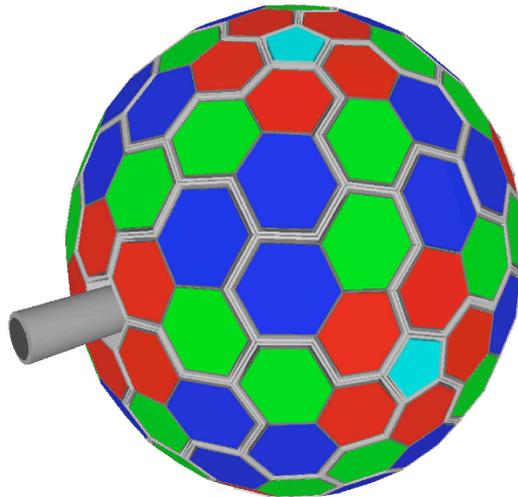
- 3) Faisceau stable ou RIB à 50-100 A.MeV (CSS1/2 et SSSI)**
- 4) Faisceau stable à 1 A.MeV pour irradiation (C0 et IRRSUD)**
- 5) Faisceau stable à 8-10 A.MeV (SME)**

EURISOL (2016) : la future installation ISOL en Europe

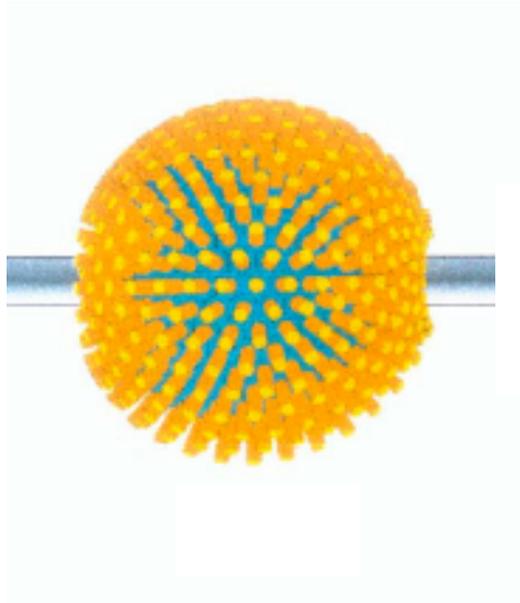


Instrumentation pour la structure et dynamique nucléaire, deux projets « phare »

AGATA (**A**dvanced **G**amma **T**racking **A**rray)



FAZIA (**F**our π **A** and **Z** **I**dentification **A**rray)



Structure et dynamique nucléaire : la quête des extrêmes

Le noyau atomique se trouve au cœur de l'univers et constitue plus de 99% de sa masse visible. Comprendre ses propriétés est un des enjeux de la recherche fondamentale. L'étude du noyau atomique, système fini de fermions en interaction dont les propriétés sont gouvernées à la fois par l'interaction forte et les interactions faibles et électromagnétiques, offre un potentiel de connaissance approfondie de notre univers car elle met en jeu un très grand nombre de phénomènes fondamentaux.

Dans les dernières années la physique nucléaire s'est orientée vers l'étude de la réponse des noyaux à des sollicitations extrêmes : rotations rapides, compressions et températures élevées, grande dissymétrie neutron-proton. La décennie à venir devrait être celle de la quête des limites de stabilité du noyau : limite en isospin grâce à l'approche des drip lines, limite en déformation avec la recherche de l'hyper-déformation, limite en masse avec la poursuite de l'aventure des noyaux super-lourds, limite en température et transition de phase.

Du problème à N-corps à l'univers complexe

Les deux questions centrales de la physique nucléaire sont : comment un système complexe comme le noyau se construit-il à partir de quelques ingrédients simples et comment les régularités observées émergent-elles de ces systèmes complexes ? La physique nucléaire a su développer différentes réponses à ces questions contribuant ainsi à l'étude des systèmes quantiques fortement corrélés. Sa tâche essentielle est d'établir, à partir de l'interaction forte qui existe entre mésons et nucléons, les différents mécanismes conduisant aux propriétés statiques et dynamiques observées dans les noyaux, ainsi que leurs comportements au cours des collisions nucléaires. Ce sont in fine, les propriétés microscopiques ou mésoscopiques de ce système quantique, gouvernées par l'interaction forte et de sa dépendance en densité et en moment angulaire, qui sont l'objet des études menées en physique nucléaire. L'expérimentation et la modélisation de ces propriétés contribuent largement à la compréhension des systèmes quantiques dans de nombreux domaines.

Grâce aux développements de faisceaux de noyaux de plus en plus éloignés de la vallée de stabilité, notre connaissance du noyau s'étendra aussi bien du côté des noyaux riches en protons que du côté des noyaux riches en neutrons. En particulier, la compréhension de la structure et des mécanismes de production des noyaux super-lourds, la détermination des pressions et des énergies d'excitation limites en fonction du rapport N/Z représentent des enjeux majeurs de la physique nucléaire. Des phénomènes propres aux noyaux très instables comme les systèmes borroméens, les halos et peaux de neutrons, la structure des états faiblement liés et résonants près des drip-lines, les décroissances exotiques, l'émergence de nouveaux nombres magiques, de nouvelles excitations collectives, la multifragmentation à haut rapport N/Z doivent être étudiées expérimentalement pour donner de nouveaux points d'ancrage aux modèles. Un effort considérable est en cours pour repenser la nature de l'interaction effective utilisée dans ces modèles et pour les étendre de façon à mieux décrire les états faiblement liés des noyaux instables et leur couplage aux états du continuum. Il faut également progresser dans la compréhension des divers signaux de la transition de phase nucléaire et dans l'affinement des théories statistiques des systèmes finis.

Ces études concernent des domaines autres que la physique nucléaire. L'astrophysique (réactions nucléaires à basse énergie, dépendance en densité de l'énergie d'asymétrie), la mécanique statistique hors équilibre des femto-systèmes (transition de phase), l'étude des nano-grains métalliques ou les atomes froids dans les pièges magnétiques (RPA et au-delà) sont des disciplines

où les concepts développés en physique nucléaire sont mis à contribution. La physique nucléaire est donc communicable vers la physique des clusters métalliques, des supraconducteurs à haute température (condensats de Bose-Einstein), vers les modèles pour systèmes à faible nombre de particules, largement utilisés en physique atomique et moléculaire, vers les questions d'astrophysique liées aux scénarios des processus de nucléosynthèse et de structure des étoiles à neutrons, vers les études des interactions fondamentales, vers les problèmes de société (applications, retraitement des déchets nucléaires). Tous ces liens montrent que la physique nucléaire propose un « discours » sur la réalité de l'univers complexe.

Limites d'existence du noyau atomique

Les concepts traditionnels de la structure et des propriétés du noyau atomique sont depuis quelques années remis en cause par des résultats expérimentaux inattendus. Cet ensemble de données sur les noyaux loin de la vallée de stabilité, sur les noyaux super-lourds, sur les états nucléaires très excités, très déformés et/ou en rotation rapide, sur les états isomériques constitue un énorme bras de levier pour modéliser cet ensemble fini constitué de protons et neutrons. C'est ainsi que l'avènement de machines fournissant des faisceaux de noyaux encore plus exotiques et plus intenses que ceux aujourd'hui disponibles est crucial pour ces études.

Les drip-lines

Les noyaux très riches en neutron constituent une zone où la proximité des états liés et des états du continuum peut entraîner des modifications profondes des propriétés du noyau. La zone de la drip-line proton offre, quant à elle, la possibilité unique d'observer de nouvelles formes de radioactivité permettant de pousser à l'extrême les modélisations traditionnelles. L'accès aux drip-lines offre donc d'une part la possibilité d'accéder à de nouvelles propriétés du noyau et d'autre part l'opportunité de tester les modèles nucléaires à leurs limites. Donc d'une part, la question de l'existence d'un noyau très exotique est une question fondamentale, c'est ainsi que la nature des noyaux à halos, la réalité éventuelle du quadri-neutron, les radioactivités exotiques sont des défis pour les modélisations. D'autre part, la spectroscopie de ces noyaux très exotiques, de part l'extension de la gamme en isospin, fournit des tests puissants pour les méthodes de modélisation. La connaissance de l'évolution de la structure en couches du noyau avec le nombre de constituants est un objectif phare de la discipline. L'apparition de nouvelles fermetures de couches, la disparition des nombres magiques connus pour les noyaux stables, l'existence des îlots de stabilité des noyaux super-lourds sont autant de signaux expérimentaux attendus.

Ainsi l'objectif de la Physique de « Structure aux drip-lines » pour les dix ans à venir est de progresser dans la connaissance des noyaux exotiques loin de la stabilité, pour mieux comprendre l'interaction nucléaire, des limites de cohésion des noyaux et pour pouvoir prédire l'ensemble de leurs propriétés statiques et dynamiques sur toute la table de masse. Les faisceaux radioactifs remettent en cause notre compréhension de l'architecture des noyaux qui reposait essentiellement sur des études de noyaux stables ou proches de la vallée de stabilité. Un effort théorique important est en cours pour expliquer les nouveaux phénomènes et améliorer la fiabilité des modèles sur toute la carte des noyaux. Pour mieux appréhender cet objet à multiples facettes qu'est le noyau, des nouvelles données sont nécessaires qui requièrent une grande diversité des faisceaux exotiques disponibles (nature et énergie) et une variété d'approches expérimentales complémentaires via les projets instrumentaux (**AGATA, EXABENE, GRAPA,...**).

SPIRAL-2 est le projet phare de la communauté française pour étudier la structure des noyaux exotiques. Il permettra d'explorer de nouvelles régions de la table des noyaux et de tester les prédictions des modèles théoriques. Avec les faisceaux stables délivrés par les cyclotrons, les faisceaux secondaires légers de SISSI à énergie intermédiaire et de SPIRAL à basse énergie, et les nouveaux faisceaux exotiques de SPIRAL-2, le GANIL fournira toute une palette de noyaux en

parfaite complémentarité avec GSI. Face à l'augmentation du temps de faisceau nécessaire pour réaliser une expérience avec des faisceaux radioactifs, la disponibilité de deux machines multi-faisceaux, **GANIL/SPIRAL-2** à partir de 2009, et **GSI/FAIR** à partir de 2012 est essentielle pour que les physiciens européens et en particulier français puissent garder un rôle prédominant en structure et dynamique nucléaire, dans un contexte de très forte compétition internationale (USA, Japon).

L'infrastructure en place au GANIL, avec les équipements expérimentaux existants et en projet et la qualité du support technique, est un atout supplémentaire pour que le laboratoire joue pleinement son rôle de pôle d'excellence européen en structure et dynamique nucléaire.

Par ailleurs, **SPIRAL-2** représente un défi technologique qui contribue à la R&D nécessaire pour **EURISOL** et permet à la France de se positionner pour accueillir cette future installation européenne à l'horizon 2015-2020.

Formes et symétries

La structure fondamentale du noyau peut être comprise grâce à l'identification et la caractérisation des états nucléaires en fonction de l'énergie d'excitation et du moment angulaire. Les noyaux en rotation rapide peuvent changer de forme sous l'action des forces d'inertie. C'est ainsi qu'en tournant à très grande vitesse, un noyau peut se déformer et adopter différentes formes puis en quelques milliardièmes de seconde, il se désexcite et récupère sa forme initiale. L'étude de ces formes extrêmes éphémères conduit à une meilleure connaissance de l'interaction forte qui lie entre eux les nucléons. L'étude du phénomène de super-déformation qui a permis un test primordial des différents modèles nucléaires en est un bel exemple. L'utilisation de faisceaux très exotiques permettra d'effectuer des tests plus approfondis du noyau à des états extrêmes en moment angulaire en variant aussi son rapport proton sur neutron.

Les techniques expérimentales utilisées jusqu'à présent, en particulier les faisceaux stables et les multi-détecteurs à rayonnement gamma, ont permis d'importantes avancées dans la compréhension de la cohésion des noyaux à très haut spin ou très déformés mais il subsiste de nombreuses questions concernant le comportement collectif ou individuel des nucléons, l'évolution de l'appariement à très haut spin ainsi que le spin maximum que peut supporter un noyau. Des progrès spectaculaires sont attendus dans ce domaine grâce d'une part, au développement, dans un cadre européen, d'un nouveau spectromètre de rayonnement gamma, (**AGATA** pour "Advanced GAMMA Tracking Array") et de détecteurs associés de particules chargées ou de noyaux de recul, et d'autre part, de nouveaux accélérateurs de **faisceaux stables de haute intensité** et de faisceaux radioactifs (**SPIRAL**, **EURISOL**) d'énergies se situant autour de la barrière coulombienne. En effet, le gain en efficacité de détection attendu et la possibilité de produire, par réactions de fusion-évaporation induites par des faisceaux radioactifs, des états de très haut spin avec une stabilité accrue dans des noyaux stables ou riches en neutrons ouvriront la voie à la recherche de nouveaux phénomènes très rares, prédits par les calculs théoriques mais non encore observés expérimentalement, telle la transition de Jacobi, l'hyper-déformation ou l'existence de niveaux supérieurs de symétries. Les développements de ces instruments et de ces accélérateurs sont en cours principalement dans le cadre de projets européens et les physiciens français y sont fortement impliqués.

Du liquide au gaz de nucléons

En augmentant l'énergie de bombardement, les collisions nucléaires permettent de fabriquer des noyaux de plus en plus excités jusqu'à n'obtenir au final qu'un gaz de nucléons. D'un état liquide, en augmentant son énergie d'excitation, le noyau subirait une transition de phase dont le signal caractéristique serait la multifragmentation (production multiple de fragments). Les enjeux de physique sont ici : 1) la mesure de grandeurs nucléaires fondamentales comme les densités de niveaux ou l'équation d'état ; 2) l'étude des limites d'existence des noyaux soumis à des contraintes

thermiques (température limite) ou mécaniques (rupture et déformation dynamiques). Pour comprendre la compatibilité théorique des différents signaux déjà observés, une large collaboration internationale s'est engagée autour d'une initiative de comparaisons critiques des différents modèles théoriques ainsi que des données expérimentales (World Consensus Initiative). Ce domaine a une place charnière entre la structure nucléaire et la physique des phénomènes critiques. Les résultats expérimentaux récents alliés au développement de nouveaux concepts théoriques le placent au premier plan pour répondre aux préoccupations actuelles de la physique des phénomènes à l'équilibre et hors équilibre des systèmes transitoires de taille finie. L'exploitation future de faisceaux très exotiques renforcera la spécificité et l'originalité de ce thème qui réside dans le fait que le noyau est un fluide à deux composants (les protons et les neutrons).

Les multi-détecteurs de grande efficacité comme INDRA sont incontournables pour cette physique qui nécessite des mesures exclusives. C'est parce qu'elle s'est fédérée autour d'un tel outil et qu'il existe une forte synergie entre théorie et expérience que la communauté française a atteint un niveau d'excellence dans la compétition internationale. Les expériences futures auront pour objectifs d'évaluer les contraintes imposées par la dynamique de la collision sur le processus de multifragmentation et de déterminer les caractéristiques thermodynamiques du système dans le diagramme de phase (volume de freeze-out, température, potentiel chimique). L'utilisation des faisceaux exotiques fournira des informations décisives sur le diagramme des phases et de nouvelles observables pour la détermination de l'équation d'état pour des valeurs extrêmes du rapport N/Z où la multifragmentation est attendue pour des excitations relativement faibles.

La problématique requiert dès maintenant un système de détection performant, permettant de gagner en granularité, de diminuer les seuils de détection, de mesurer précisément les distributions isotopiques sur une large gamme de fragments, de mesurer les vecteurs vitesses des produits libérés. Ces améliorations permettront une exploitation optimale des potentialités offertes par les faisceaux radioactifs de **SPIRAL-2** et **EURISOL**. Le détecteur 4π de 3^{ème} génération indispensable apparaît être le concept européen **FAZIA** décrit dans le document « instrumentation for EURISOL ». La thématique nécessite de maintenir la disponibilité des faisceaux du GANIL et la compétitivité des installations LISE et SISSI jusqu'à l'arrivée de faisceaux exotiques d'énergies équivalentes délivrées par une installation ISOL. Des expériences complémentaires pourront être menées auprès d'autres installations (par exemple GSI) pour peu que les faisceaux délivrés par la machine soient adaptés à notre thématique. Ces outils expérimentaux donneront à la communauté française et européenne les moyens d'acquérir une position dominante dans la physique des collisions d'ions lourds aux énergies intermédiaires et dans la physique statistique des systèmes finis.

Les super-lourds

La quête des noyaux super-lourds entend répondre à un ensemble d'interrogations fondamentales : quelle est la masse limite des noyaux, quels sont les éléments chimiques qui peuvent exister et quelles sont leurs propriétés chimiques ? L'existence des noyaux super-lourds repose sur une stabilisation accrue des noyaux par des effets de couche quantiques de couche qui contrecarieraient la répulsion coulombienne. Selon les modèles, cet îlot de stabilité serait localisé à N=184 autour de Z=120-126. Les études spectroscopiques des super-lourds permettent de mieux cerner cet îlot tout en nous renseignant sur la structure de la matière nucléaire à ses limites. La compréhension et surtout l'optimisation de la synthèse des super-lourds passe aussi par l'étude des mécanismes qui y participent : fusion, quasi-fission, fission, évaporation... et de leur compétition.

Dans le monde, les expériences de synthèse d'éléments super-lourds se déroulent sur des machines quasiment dédiées à cet effort : GSI (Z=112 par fusion dite froide), Dubna (Z=118 par fusion dite chaude), RIKEN (confirmation du Z=112 et peut-être Z=113). La communauté française est impliquée dans des études de mécanismes réalisées à Dubna, à Legnaro et dans des études spectroscopiques à Jyväskylä ainsi que dans celles en projet à Dubna. Au GANIL ont eu lieu des

expériences de synthèse ($Z=108$), de spectroscopie (^{251}Md) et de mécanismes (mesure des temps de fission du noyau composé $Z=120$).

Dans le futur, il conviendra de confirmer les résultats obtenus par Dubna (avec des cibles d'actinides), en mettant en œuvre de nouvelles techniques d'identification non ambiguës des noyaux formés : pièges à ions, séparation chimique... De nouvelles voies de synthèse peuvent être explorées : fusion symétrique, utilisation de faisceaux de noyaux riches en neutrons. La spectroscopie des super-lourds légers ($Z<109$) reste à faire. Elle exploitera les instruments les plus récents (**AGATA**) ainsi que de nouvelles méthodes comme la spectroscopie laser (**EXABENE**). Compte tenu des grandes incertitudes qui demeurent sur les processus mis en jeu, les études de mécanisme doivent se poursuivre : mesures des temps de fission permettant la localisation directe de l'îlot, backtracing neutron (**SATAN**), détection de gammas. En outre, à terme, la progression vers l'îlot de stabilité passera nécessairement par l'utilisation d'un **accélérateur de faisceaux stables de très haute intensité** avec une ligne dédiée à la synthèse des super-lourds possédant un **spectromètre de grande acceptance** ($>70\%$) et un fort pouvoir de réjection ($>10^{12}$).

Les réactions nucléaires

Les réactions nucléaires sont un outil pour fabriquer des états nucléaires, elles sont donc intimement liées à l'étude du noyau et de ses limites. L'autre facette des réactions nucléaires est de permettre d'étudier la dynamique des collisions qui intègre une phase de transport, la voie d'entrée, et une phase de désexcitation, la voie de sortie. La détection des produits de réaction fournit des informations sur toute cette chaîne complexe qu'il faut ensuite démêler. L'étude de ces deux phases donne un accès complémentaires aux propriétés macroscopiques des noyaux.

Mécanismes de désexcitation

L'étude des mécanismes des réactions permet d'accéder aux propriétés macroscopiques du noyau telles que, par exemple, l'émission de fragments, les barrières et les temps de fission, la viscosité de la matière nucléaire et, enfin, l'influence de la structure en couches des noyaux sur ces grandeurs. Si des progrès très importants dans ce domaine ont été obtenus récemment sur les réactions de spallation au GSI, il n'en demeure pas moins que les observables expérimentales dépendent de la combinaison des effets des voies d'entrée (propriétés de la sonde utilisée) et de sortie (désexcitation du noyau composé). L'étude des mécanismes de réaction doit se poursuivre par la mesure d'observables plus sensibles au noyau composé formé dans les réactions, ce qui permettra de mieux séparer ce qui dépend de la voie d'entrée et ce qui est lié à la désexcitation.

Plusieurs méthodes expérimentales sont envisagées :

- la mesure la plus exclusive possible, en cinématique inverse, des produits de réactions et la reconstruction cinématique la plus complète possible du noyau composé, sur le modèle de ce qui a été fait avec INDRA (au GANIL et au GSI). Mais comme dans l'expérience SPALADIN (GSI), les nouvelles mesures doivent être faites en association avec un spectromètre de recul pour reconstituer l'énergie dissipée dans le système lors de la collision et signer le mode de désexcitation (fission, fragmentation, évaporation) ;
- la variation des modes d'excitation du noyau, certaines réactions à basse énergie comme la fusion ou le transfert forment un noyau dans un état bien défini tout en offrant des voies de sorties très diverses, de la fission à la formation de « clusters » ;
- un programme sur la mesure des temps longs de fission par blocage dans des cristaux, comme cela a été initié au GANIL, ou par spectrométrie X, et de l'excitation résonnante des noyaux.

L'ensemble de ce programme nécessitera la réalisation d'expériences de fission, de fusion à basse énergie au GANIL avec les faisceaux exotiques de **SPIRAL**, **SPIRAL-2** et au **GSI/FAIR** avec des faisceaux stables pour l'étude de la spallation et de la fission et avec des faisceaux radioactifs pour les expériences de fission. Des expériences de canalisation sont prévues

auprès des deux accélérateurs et nécessiteront la construction de deux installations expérimentales. Les études de spallation nécessiteront des développements techniques autour d'un nouvel aimant de grande acceptance et à fort pouvoir de déviation magnétique (**GLAD/R3B**). Dans ce cadre le développement de détecteurs multi-trace pour les particules chargées de grande résolution et de grande dynamique de signal est envisagé.

Dynamique de la voie d'entrée

La stratégie adoptée ici ne repose pas seulement sur la sélection de certaines collisions pour lesquelles la dynamique peut être contrôlée par quelques variables collectives, mais aussi sur l'utilisation de situations expérimentales présentant des signaux clairs d'effets dynamiques dominants. Ces situations expérimentales, ensembles projectile, cible et énergie de bombardement, sont connues grâce aux résultats obtenus notamment avec INDRA. L'utilisation de faisceaux exotiques permettra de fournir des contraintes sévères sur les modèles de transport et leurs ingrédients fondamentaux. Les processus en jeu sont « l'émission au col » dont la formation pourrait être le résultat combiné d'instabilités de surface et de volume, la fission dynamique alignée, le « flow », la transparence, ... autant de processus qui permettent de quantifier les propriétés de transport de la matière nucléaire (compressibilité, viscosité, ...) en disposant d'une large panoplie de faisceaux. La complémentarité avec l'étude des mécanismes de désexcitation est évidente ainsi que le lien avec l'étude des limites extrêmes des noyaux.

A partir des expériences futures, différents scénarios seront explorés pour caractériser la dynamique de la voie d'entrée et pour évaluer ses contraintes sur le processus de multifragmentation. L'analyse croisée des conditions d'apparition des signatures de transition et de criticité permettra de vérifier si ces signatures correspondent à des explorations différentes du diagramme des phases. L'utilisation des faisceaux radioactifs fournira une contrainte supplémentaire en étudiant entre autres l'équilibration en charge, et permettra par exemple de déduire le terme d'asymétrie de charge de l'équation d'état.

Cette problématique intimement liée à l'étude de la multifragmentation comme limite extrême des noyaux demande les mêmes ressources expérimentales. Les maîtres mots sont, une fois encore, **FAZIA**, disponibilité des faisceaux du GANIL et la compétitivité des installations LISE et SISSI jusqu'à l'arrivée de faisceaux exotiques d'énergies équivalentes délivrées par une **installation ISOL**.

Interactions fondamentales et symétries

Les études des interactions fondamentales ont pour but une description unifiée des quatre forces fondamentales. Les symétries, responsables notamment des lois de conservation, y jouent un rôle important. C'est à travers la décroissance beta, que le noyau fournit un laboratoire privilégié pour l'étude des interactions fondamentales et des symétries. L'avènement des machines à faisceaux exotiques permettra d'étendre les mesures et de réduire les erreurs expérimentales.

En France, de telles études sont réalisées auprès d'accélérateurs de physique nucléaire de basse énergie via deux approches : mesurer les propriétés des transitions beta super-permises (par la spectroscopie en masse et la spectroscopie nucléaire) et mesurer les observables de corrélation (en étudiant la cinématique de la décroissance). Dans la première approche les équipes nationales jouent un rôle de premier plan. Ceci grâce à une forte tradition en spectroscopie de masse construite sur des développements d'instruments, des programmes expérimentaux établis et sur l'évaluation globale des données mondiales au sein d'une table de masses atomiques qui constitue une référence dans le monde entier et, pour ce qui concerne la spectroscopie nucléaire, des développements techniques originaux qui ont été effectués dans le cadre de programmes expérimentaux reconnus. Dans la deuxième approche, la communauté a désormais les moyens techniques d'étudier les observables de corrélations grâce à la réalisation d'une trappe de Paul

entourée de détecteurs qui est opérationnelle. Il est à noter également la participation à des mesures de précision concernant la violation du renversement du temps dans la décroissance de neutrons libres polarisés.

Les données actuelles sur les transitions super-permises doivent (1) être étendues vers des masses élevées et (2) améliorées en précision. La réduction des incertitudes demandera un effort important en instrumentation. Pour ce qui concerne les mesures des coefficients de corrélation, cette amélioration de la précision passera aussi par la réalisation de mesures indépendantes. L'extension vers des noyaux plus lourds demandera l'utilisation de réactions de fusion évaporation pour les produire et un accent doit être mis sur la production de faisceaux purs et la qualité. Ces conditions devraient être satisfaites par une prochaine génération des équipements (**EXABENE**) liés aux installations ISOL (**SPIRAL-2**, **EURISOL**) et ceux développés pour la ligne à très basse énergie de **GSI-FAIR**. L'utilisation de tels appareillages auprès des prochaines machines à haute intensité demandera le développement en parallèle de faisceaux et de techniques de discrimination. Ce point a été souligné dans le rapport « EURISOL Design Study ». Avec l'accroissement nécessaire du nombre d'approches expérimentales et d'observables, les expériences dans ce domaine qui nécessitent une grande statistique et une systématique (quelquefois redondante) souffrent désormais d'un manque de temps faisceau. Ceci ne pourra être surmonté que par l'utilisation des différentes installations européennes.

Nouvelles sondes

Lasers Ultra Haute Intensité (UHI)

Les années 1990-2000 ont vu l'émergence de lasers Ultra Haute Intensité (puissances crêtes de l'ordre de la dizaine de terawatts (TW) et des intensités sur cible de 10^{20} W/cm²).

L'interaction d'un tel laser avec la matière se traduit instantanément par la formation d'un plasma dense et chaud. Les perturbations locales de la charge électrique et de la densité sont à l'origine de différents mécanismes d'accélération des particules chargées dans l'interaction laser plasma. Des faisceaux d'électrons rapides peuvent être créés et il a été montré que les lasers UHI pouvaient également être utilisés pour produire des faisceaux de H⁺ et d'ions lourds sous un potentiel moyen de 10 MV. L'utilisation de lasers pétawatts permettrait d'envisager des potentiels d'accélération de 100 MeV/unité de charge. Ces faisceaux présentent des caractéristiques en temps très différentes de celles des faisceaux conventionnels de physique nucléaire (durée des impulsions de l'ordre de quelques dizaines de femtosecondes, taux de répétition du hertz au kilohertz, nombre de particules/pulse très élevé $>10^{10}$). Ils offrent de plus la possibilité de produire en parallèle avec le faisceau de particules chargées des plasmas qui peuvent servir de cibles pour des réactions nucléaires ouvrant ainsi un nouveau domaine d'investigation des propriétés nucléaires dans les conditions plasma.

Faisceaux de neutrinos de basse énergie

Des études peuvent être réalisées avec faisceaux de neutrinos de basse énergie, et de faisceaux où l'énergie peut être variée facilement. Une nouvelle méthode pour la production des neutrinos a été introduite: les « beta-beams ». Elle consiste à utiliser la désintégration beta des noyaux accélérés pour produire des faisceaux purs de neutrinos et d'anti-neutrinos. L'Helium-6 et le Neon-18 sont les meilleurs candidats en tant qu'émetteurs « beta-beam ». L'énergie des neutrinos peut être modifiée en variant l'énergie des ions.

Une installation « beta-beams » de basse énergie offrirait l'opportunité unique de réaliser des études systématiques des interactions neutrino-noyau ainsi que des modes d'isospin et de spin-isospin de haute multipolarité. D'autres propriétés des neutrinos comme leur moment magnétique pourraient être étudiées. La production des ces faisceaux pourrait se faire dans le cadre d'une extension du projet **EURISOL** et d'une installation « beta-beam » de haute énergie au CERN

qui aurait pour but, entre autre, d'étudier la violation de CP dans le secteur des leptons. L'étude de faisabilité d'une installation beta-beam de basse énergie sera réalisée - conjointement au projet de haute énergie - au sein du « Design Study » de EURISOL.

Conclusion et moyens pour un objectif de performance

La France occupe depuis longtemps une position de premier plan en structure et dynamique nucléaire dans un contexte de très forte compétition internationale. En ce qui concerne les programmes expérimentaux la communauté française est notamment impliquée dans la recherche des noyaux aux états extrêmes (spin, énergie d'excitation, rapport proton/neutron, super-lourds). Récemment un effort considérable a été mené en France pour construire SPIRAL et dans le développement des nouveaux instruments (EXOGRAM et VAMOS au GANIL par exemple). Les potentialités des installations actuelles doivent être utilisées en développant de nouveaux faisceaux SPIRAL et en augmentant les intensités des faisceaux primaires du GANIL. Pour l'avenir à plusieurs années, l'effort doit être axé dans un contexte européen vers la construction de SPIRAL-2 et vers une implication importante dans l'instrumentation basse-énergie, les spectromètres et les multidétecteurs de nouvelle génération qui permettront de franchir des étapes cruciales dans la détection des gammas (AGATA), des particules chargées (FAZIA, GRAPA) et des neutrons (SATAN). En parallèle, la communauté doit contribuer aux études des futurs accélérateurs Européens EURISOL et FAIR-GSI. Pour ce qui est de la théorie, la situation française actuelle se caractérise par une forte activité dans le domaine de la théorie du champ moyen et ses extensions, les calculs de modèles en couches pour les noyaux lourds et les enjeux liés aux réactions nucléon-noyau et noyau-noyau. Pour l'avenir, la forte synergie avec l'expérience doit continuer et les succès reposeront sur le développement d'outils théoriques novateurs. Toutefois seul un investissement humain et financier au moins égal à l'investissement actuel permettra à la physique nucléaire théorique et expérimentale française de conserver sa place de premier plan et de réaliser ses objectifs.

On trouvera en annexe un tableau résumant les projets du groupe « structure et dynamique nucléaire ». Les priorités indiquées dans ce tableau ont été établies en tenant compte de l'importance scientifique, du calendrier de réalisation et de la force des communautés impliquées.

Structure et dynamique nucléaire : Théorie

Tout progrès dans notre compréhension théorique du monde physique est poussé par la découverte expérimentale. Parallèlement, chaque programme expérimental en physique doit être guidé par les questions théoriques pertinentes d'actualité. Cet échange permanent entre la théorie et l'expérience doit figurer au centre de toute réflexion s'agissant de perspectives. Dans le cas de la structure et dynamique des noyaux, l'avènement de faisceaux de noyaux exotiques va à terme enrichir par milliers la carte des noyaux, du côté riche en protons et surtout du côté riche en neutrons. Des phénomènes nouveaux comme les halos et peaux de neutrons, la structure nucléaire près des drip-lines, la modification des couches et des nombres magiques, les nouveaux modes collectifs inexpliqués, la décroissance par deux protons, etc.... doivent encore être étudiés et compris. L'extension de la carte des noyaux inclut aussi les noyaux super-lourds qui représentent toujours un enjeu majeur en physique nucléaire.

Dans les prochaines années, le principal effort en ce qui concerne l'activité expérimentale de la physique nucléaire de basse énergie en France sera centré sur le programme de recherche de SPIRAL et SPIRAL 2. Ce programme peut lui même être considéré comme une étape dans un plan à long terme vers une physique nucléaire à l'échelle européenne. La problématique de la physique pour ces équipements de faisceaux radioactifs a été exposée dans plusieurs publications (« Physics Case » de SPIRAL 2 et EURISOL) et ne sera pas répétée ici. Nous pensons que les théoriciens nucléaires en France ne doivent pas seulement suivre attentivement cette évolution mais doivent aussi fournir l'inspiration nécessaire à ces développements. Par conséquent, les théoriciens nucléaires doivent se poser la question :

Quelles sont les expériences clé envisageables avec un faisceau d'ions radioactifs et comment, en tant que théoriciens pouvons nous renforcer la portée de ce programme expérimental et augmenter sa visibilité auprès d'autres communautés en physique ?

Comme tout exercice de ce type, la réponse à cette question demande une réflexion sur l'état actuel des lieux et une projection de cette situation vers l'avenir.

Les années récentes ont vu une activité intense dans le domaine des noyaux et des états nucléaires exotiques : noyaux loin de la stabilité, noyaux super-lourds, états nucléaires très excités, très déformés et/ou en rotation rapide, états isomériques. Les nombreuses expériences ont fait apparaître des phénomènes inattendus : déplacement ou disparition des nombres magiques, inversion de parité, halos et peaux de nucléons, brisures spontanées de nouvelles symétries, nouveaux types de radioactivité... Ces nouvelles découvertes remettent en cause beaucoup des concepts traditionnels de la structure des noyaux. Ils sont à l'origine d'un renouveau important des programmes théoriques actuels dans ce domaine.

Jusqu'à $A=3$ et 4 il est possible de résoudre directement l'équation de Schroedinger pour 3 ou 4 nucléons interagissant à travers des interactions à 2 corps, et il y a dans notre communauté de théoriciens une bonne expertise de ces problèmes qui se révèle très utile pour les études expérimentales sur la structure du système à 4 neutrons. Au dessus de $A=4$, une avancée récente et spectaculaire a été les **calculs *ab initio*** (c.à.d., en prenant l'interaction entre nucléons libres comme point de départ) pour les noyaux légers jusqu'à la masse 12 . Ces études démontrent que l'introduction d'une force à trois nucléons est un ingrédient indispensable pour une bonne reproduction des énergies et spectres des noyaux légers et que des réactions nucléaires spécifiques peuvent constituer un test de la dépendance en isospin de cette force. Une extension des calculs *ab initio* à des noyaux au-delà de $A=12$ ne peut s'effectuer qu'en utilisant des nouvelles techniques pour résoudre le problème à N corps comme, par exemple, les méthodes de Monte-Carlo ou du groupe de renormalisation de la matrice de densité.

Pour les noyaux encore plus lourds, un traitement *ab initio* devient rapidement impossible à cause des dimensions de l'espace de configurations. Une panoplie de méthodes, dites toujours microscopiques, existe pour résoudre (approximativement) le problème nucléaire à N corps, notamment le **modèle en couches** et la **théorie du champ moyen** (non-relativiste aussi bien que relativiste) et ses extensions (par exemple, RPA ou mélange de configurations). Des efforts importants sont réalisés pour étendre ces méthodes afin de mieux décrire les états et les systèmes exotiques : noyaux faiblement liés avec l'introduction du couplage entre les états liés et le continuum, brisures de nouvelles symétries, approches RPA self-consistantes, nouveaux types de mélanges de configurations. Un effort considérable est en cours afin de repenser la nature de l'interaction nucléaire effective et en dériver de nouvelles formes. L'objectif est de déterminer des paramétrisations relativement simples, capables de décrire aussi bien les propriétés globales des noyaux que les différents types de corrélations dont ils sont le siège - appariement, coexistence de formes, sous-structure en particules α - et fournissant un comportement en fonction de l'isospin plus réaliste que les paramétrisations actuelles. Ces études ont de nombreux prolongements : description microscopique de phénomènes collectifs de grande amplitude comme la fission ou les collisions d'ions lourds à basse énergie, dérivation du potentiel optique nucléon-noyau, propriétés des noyaux chauds. On peut noter que l'approche du champ moyen relativiste ne reçoit encore qu'une attention modeste dans notre communauté par rapport à l'approche non relativiste, une situation qui mérite de changer au vu des développements récents visant à relier le champ moyen relativiste et l'approche de QCD à basse énergie. Enfin, il faut signaler que les techniques de calcul sur réseau dans un contexte nucléaire, c'est-à-dire pour des systèmes constitués de champs de nucléons et de mésons en interaction, sont envisageables et représentent une nouvelle ouverture théorique.

La question centrale dans ces approches microscopiques est comment un système complexe comme le noyau se construit à partir de quelques ingrédients simples. Un thème associé est l'émergence des simplicités et régularités observées dans ces mêmes systèmes complexes. Une des richesses de la physique nucléaire est l'interactivité permanente entre ces deux aspects, avec des descriptions microscopiques et complètes qui fournissent une base solide pour des **modèles phénoménologiques** et qui permettent une analyse simple et élégante des modes collectifs qui apparaissent dans tout système de fermions en interaction forte.

Les recherches actuelles visent non seulement à une bonne compréhension de la structure de tous les noyaux, mais également de la dynamique associée. L'étude des **réactions nucléaires** a pour objectif de comprendre la dynamique des collisions nucléon-noyau ou noyau-noyau en fonction de l'énergie du projectile et de la nature des états finaux. Cette étude est importante pour diverses applications, notamment en astrophysique ou en neutronique, et pour la recherche des noyaux super-lourds. La description simultanée et cohérente de la structure des noyaux et des réactions nucléaires reste un des objectifs finaux en physique nucléaire. On peut constater un rapprochement récent entre les deux domaines, considérés comme séparés auparavant. Un premier exemple est fourni par l'analyse des réactions directes du type (p,p') avec des faisceaux radioactifs en cinématique inverse, où les potentiels optiques et de transition sont calculés microscopiquement. Un autre exemple est le modèle en couches avec continuum ou le champ moyen avec continuum qui permettent une description consistante des canaux ouverts et établit donc un lien entre les états liés et non-liés, et les réactions directes. L'étude aussi bien expérimentale que théorique des systèmes faiblement liés, où ces deux aspects - structure des noyaux et dynamique des réactions - se rapprochent, est particulièrement importante pour avancer dans ce programme.

Les approches microscopiques des systèmes infinis tels que la matière nucléaire, la matière de neutrons, leurs équations d'état, etc ... méritent toute l'attention de la communauté de structure et dynamique des noyaux. Leur étude à l'aide des méthodes microscopiques du problème à N corps est non seulement utile pour décrire la physique des objets stellaires compacts, mais elle est

aussi à la base de la compréhension des noyaux finis. L'équation d'état de la matière de neutrons est une des clés pour comprendre les explosions stellaires telles que les supernovae. Un ensemble de problèmes résultent de ce que la matière des étoiles à neutrons est superfluide et leur dynamique en est très fortement affectée. Ainsi, comprendre l'évolution des « glitches » nécessiterait de savoir calculer l'appariement *ab initio* à partir de l'interaction nucléon-nucléon libre. De même, la connaissance de la phase superfluide des neutrons est importante pour décrire l'écoulement du fluide de neutrons à travers le réseau cristallin des noyaux dans la croûte d'une étoile à neutrons. Un autre aspect important est d'obtenir par le calcul une bonne estimation des libres parcours moyens des neutrinos dans la matière stellaire car c'est une donnée fondamentale des calculs de simulation de refroidissement des proto-étoiles à neutrons et des explosions stellaires. Toutes ces études *a priori* purement théoriques ont un contact avec l'expérience car l'équation d'état de la matière nucléaire peut être confrontée avec des réactions entre ions lourds. Aux énergies non relativistes les noyaux chauds, la multifragmentation, la transition liquide-gaz sont activement étudiés expérimentalement. On peut citer comme étapes marquantes la vaporisation des noyaux, la mise en évidence de la courbe calorique et de la décomposition spinodale.

Signalons qu'une bonne compréhension de la structure et de la dynamique des noyaux joue un rôle clé dans plusieurs programmes expérimentaux de nature pluridisciplinaire. Ceci est particulièrement vrai pour la physique (au delà) du **modèle standard**. Par exemple, des mesures ultra-précises de la décroissance β des noyaux exotiques peuvent apporter des informations sur un des éléments de la matrice CKM, ou encore la décroissance double- β fournit des renseignements sur l'existence d'une composante Majorana dans la masse du neutrino. Toutefois, pour atteindre les précisions nécessaires il est indispensable d'améliorer le calcul des éléments de matrice nucléaires dont ces processus dépendent. Un autre exemple de pluridisciplinarité est l'**astrophysique nucléaire**. La symbiose de la physique nucléaire et l'astrophysique est un élément décisif dans notre compréhension de l'évolution des étoiles, des galaxies et de l'univers, et elle est nécessaire afin de connaître l'origine des éléments (nucléosynthèse). Cette discipline a connu et connaît toujours une évolution rapide avec l'avènement de nouveaux dispositifs expérimentaux (satellites, télescopes de rayons X,...) et, pour en tirer tous les enseignements nécessaires, la théorie devra accompagner les observations. Finalement, un certain nombre de théoriciens nucléaires mettent leurs connaissances et leur savoir-faire aux services des problèmes de société liés par exemple à l'environnement ou encore des applications médicales. On peut ainsi citer l'évaluation de données nucléaires, les réacteurs du futur, les systèmes hybrides, l'incinération des déchets ou encore le domaine biomédical à l'interface entre la théorie et l'expérience.

La physique nucléaire a une longue tradition et de nombreuses contributions à l'étude des systèmes quantiques fortement corrélés. D'importants progrès théoriques dans le problème à N corps appliqué aux systèmes finis continuent d'être réalisés et ils se propagent vers d'autres disciplines confrontées également aux problématiques des systèmes de taille finie, comme les nano-grains métalliques ou les atomes froids dans des pièges magnétiques. On constate un développement et un essaimage analogues en ce qui concerne les approches à petit nombre de corps.

Pour conclure, il se dégage de ce tour d'horizon deux recommandations concrètes pour le développement dans le proche avenir de l'activité théorique en structure et dynamique des noyaux :

- i) Pour soutenir les programmes expérimentaux de SPIRAL 2 et auprès des autres projets européens, la structure nucléaire théorique doit être renforcée de façon à maintenir l'effectif actuel malgré la vague des départs. Nous attirons particulièrement l'attention sur le fait que le savoir faire relatif à deux méthodes théoriques de base, le modèle en couches et le calcul des systèmes à quelques nucléons, ne repose plus que sur quelques personnes.

- ii) Au regard des investissements très importants effectués par la France dans le domaine de l'astrophysique nucléaire, il est très souhaitable de fédérer et d'élargir la communauté trop peu nombreuse des théoriciens français travaillant dans ce domaine.
-

Structure et dynamique nucléaire : Structure vers les drip-lines

Motivations physiques

La physique du noyau atomique a pour objectif de connaître l'interaction forte au sein du milieu nucléaire formé par l'ensemble des nucléons qui composent le noyau et ainsi d'expliquer et prédire la structure et les phénomènes générés par le noyau.

A ce jour, la passerelle entre les propriétés de l'interaction entre nucléons libres et celles de la matière nucléaire de taille finie - le noyau - est en construction, comme celle qui doit établir le lien entre la description QCD de l'interaction forte en termes de quarks et de gluons et la vision du nucléon. Les méthodes de description du noyau dites « ab initio » à partir des diffusions de nucléons libres (np et pp) ont récemment beaucoup progressé puisqu'elles permettent de reproduire les propriétés des noyaux jusqu'à la masse 12, et des bases théoriques plus solides devraient être disponibles très prochainement pour les états résonnants. Pour les noyaux de masses intermédiaires, des progrès significatifs ont été apportés par les méthodes de modèle en couches Monte-Carlo. Enfin les calculs de champ moyen auto-cohérents donnent une bonne reproduction des propriétés des noyaux lourds connus, mais fournissent des prédictions divergentes dans les régions non encore explorées de la table des noyaux, ce qui illustre bien les nombreuses inconnues du problème nucléaire et principalement la dépendance en isospin de l'interaction nucléaire, l'influence du terme de spin-orbite, le rôle du couplage aux excitations virtuelles du noyau.

Une telle description unifiée est un grand enjeu des théories du noyau pour les prochaines années. Pour caractériser l'interaction nucléon-nucléon dite effective, interaction s'exerçant entre deux nucléons subissant le champ moyen créé par les autres nucléons du noyau, et pouvoir à terme prédire le comportement des noyaux sur toute la table de masse, il faut collecter des données dans des cas qui permettent de développer notre compréhension de la structure nucléaire et d'étendre les modèles existants. Une méthode très performante pour étudier la force nucléaire consiste à mettre le noyau dans des états « extrêmes », soit de son énergie intrinsèque (limite en température), soit de son moment angulaire (limite en spin) ou encore du nombre de ses constituants (limite en charge, masse ou isospin). Ces études expérimentales donnent des informations sur la cohésion du noyau dans ces différents états extrêmes et ainsi sur la force effective par comparaison avec les modèles.

La physique des noyaux aux drip-lines a pour objet de mesurer la spectroscopie (énergie des états excités, spin et parité, moments quadripolaires, forme des noyaux) et les facteurs de forme des noyaux (répartition spatiale des nucléons du noyau dans son état fondamental et de transition vers les états excités) dans des régions éloignées de la vallée de stabilité. Ces noyaux présentent un isospin élevé comparé à leur isotope stable et ils sont qualifiés de noyaux « exotiques » du fait de leur structure inhabituelle. Les comportements spéciaux de ces noyaux ne sont pas prédits par les modèles usuels, et réclament, pour être complètement expliqués, le développement de modèles qui vont au-delà du champ moyen employé habituellement pour les noyaux stables. Les faisceaux radioactifs ont permis, au cours des dernières années, de découvrir des phénomènes nouveaux et d'en faire progresser notre compréhension: affaiblissement des effets de couches, modification de la structure en couches avec l'apparition de nouveaux sauts en énergie, déformations différentes des distributions de protons et de neutrons, distribution de la densité de matière très diffuse dans certains noyaux légers (formation de halos ou peau de neutrons), clustérisation d'alpha, nouveaux types de radioactivité (décroissance deux-protons), résonances à basse énergie,... Outre leur intérêt direct pour la structure nucléaire, la connaissance de ces noyaux exotiques est nécessaire pour les études astrophysiques, et plus particulièrement les processus de

nucléosynthèse. L'étude de noyaux le long de la ligne $N=Z$ représente en outre un outil d'étude précieux des symétries fondamentales.

Les observables nécessaires à la compréhension détaillée du noyau requièrent la mise en œuvre de méthodes expérimentales variées. Ainsi la spectroscopie des noyaux exotiques à basse énergie d'excitation nécessite l'analyse d'expériences complémentaires de mesure de masse, de décroissance radioactive, de spectroscopie gamma pour déterminer les états excités liés, d'excitation coulombienne réalisée à basse énergie (quelques MeV/nucléon) pour l'estimation des facteurs de forme, de diffusion élastique et inélastique à des énergies de 10 à 100 MeV/nucléon, de réactions de transfert de 10 à 30 MeV/nucléon ou encore de cassure du noyau à des énergies supérieures à 50-100 MeV/nucléon pour la mesure de recouvrement de fonctions d'onde (facteurs spectroscopiques), la déduction des spins et parités des états. La compréhension de la structure à plus haute énergie d'excitation passe par l'étude des réactions profondément inélastiques ou de fusion évaporation pour connaître le comportement des densités de niveaux, des modes d'excitation collectifs, etc. Ces approches complémentaires requièrent une grande diversité des faisceaux disponibles (nature et énergie) et des outils de détection.

Situation actuelle

Les méthodes actuellement utilisées pour la production des noyaux exotiques, principalement à partir des réactions de fragmentation du projectile (GANIL, GSI, MSU, RIKEN, Dubna) ou des méthodes de type ISOL (SPIRAL, ISOLDE, TRIUMF, Louvain-la-Neuve...) ont permis d'atteindre les limites actuelles de la table des isotopes. Du côté déficient en neutrons, la drip-line a pu être presque complètement dessinée expérimentalement jusqu'aux isotopes d'étain ($Z=50$). Au delà, et sur l'ensemble du côté riche en neutrons au delà de $Z=8$, les théories divergent sur le tracé des drip-lines et la connaissance actuelle reste éloignée des limites d'existence.

Les études expérimentales se sont développées depuis une quinzaine d'années grâce à l'arrivée de nouvelles installations pouvant produire des faisceaux d'ions radioactifs dans une large gamme d'énergie. La France occupe à l'heure actuelle une des toutes premières places dans le contexte international avec la possibilité de produire au GANIL des faisceaux secondaires aussi bien aux énergies de fragmentation grâce à SISSI, qu'à basse énergie, avec SPIRAL. Un des atouts majeurs de GANIL réside dans la qualité et la diversité de son équipement instrumental, et du support technique apporté aux expériences. Les faisceaux stables et radioactifs du GANIL attirent chaque année environ 250 physiciens dont plus du tiers viennent de l'étranger. Les physiciens français sont par ailleurs impliqués dans la quasi-totalité des installations mentionnées plus haut.

De même que l'étude du noyau se nourrit d'approches expérimentales variées, l'interprétation de l'ensemble des données fournies requiert en parallèle la modélisation des différentes réactions aussi bien que de la structure. Or, le nombre de théoriciens français de structure nucléaire a considérablement diminué ces dernières années. Un appauvrissement de la discipline est à craindre si l'interaction avec les théoriciens devient trop fragmentaire ou à trop longue portée.

Projets futurs et besoins techniques

(Accélérateurs, instrumentation et autres infrastructures)

Les perspectives offertes par les faisceaux radioactifs ont incité la communauté internationale de physique nucléaire à définir des projets pour des installations de nouvelle génération permettant de réaliser des expériences plus élaborées pour une compréhension plus profonde des phénomènes observés et d'accéder à des régions de la table des noyaux encore inexplorées.

Alors qu'aux Etats-Unis, le projet RIA se propose de produire, d'ici une douzaine d'années, des faisceaux radioactifs très loin de la stabilité aussi bien par méthode ISOL à basse énergie que par fragmentation autour de 400 MeV/nucleon, le Japon a choisi la voie de la production en vol par fragmentation pour sa nouvelle installation déjà en construction à RIKEN. En Europe, NuPECC a recommandé la construction de deux machines distinctes pour les deux modes de production. Le domaine de la fragmentation a été confié à GSI (FAIR prévu vers 2012), alors que la méthode ISOL sera exploitée par EURISOL dont les études de conception sont financées dans le cadre du VI PCRD. La construction et le site de cette installation seront décidés d'ici 5 ans pour un début d'exploitation vers 2016-2020.

D'ici là, des machines de génération intermédiaire permettront d'étendre la gamme des noyaux accessibles et de tester de nouveaux concepts technologiques. Elles viennent d'entrer en fonctionnement ou sont en projet : Oak-Ridge et évolution de MSU aux USA, ISAC2 au Canada, SPES en Italie, MAFF en Allemagne. En France, l'étude de la structure nucléaire est regroupée autour du GANIL et de ses faisceaux stables et faisceaux secondaires produits par SISSI et SPIRAL. Les faisceaux secondaires ainsi disponibles sont limités aux noyaux relativement légers, jusqu'aux masses=80-100. Il est nécessaire désormais d'étendre cette gamme de noyaux pour atteindre de nouvelles régions de la table où sont prévus les nouveaux changements de structures en couches. Des fragments de fission seront disponibles, dès l'année prochaine auprès d'ALTO à Orsay pour des études de propriétés de l'état fondamental et de désintégration radioactive (10^{11} fissions/s). Le projet phare de notre communauté est SPIRAL2, avec son accélérateur linéaire LINAG, qui entrera en fonctionnement en 2009 s'il est approuvé prochainement. Il mettra à la disposition des expérimentateurs des faisceaux de fragments de fission post-accélérés par le cyclotron CIME avec des taux de production de 10^{13} à 10^{14} fissions/s. Quant aux noyaux déficients en neutrons, leur étude sera possible grâce aux réactions de fusion-évaporation à partir des faisceaux d'ions lourds stables de LINAG. De plus, les réactions de transfert à partir de ces mêmes faisceaux de très haute intensité permettront de produire des noyaux légers exotiques avec des intensités bien supérieures à celles délivrées par SPIRAL actuellement. Une nouvelle génération d'expériences permettant d'accéder à des régions encore plus proches des drip-lines pourra alors être envisagée. Le dispositif actuel de GANIL (CSS1+CSS2+SISSI) doit également être maintenu pour garder la possibilité de produire des faisceaux exotiques par fragmentation et pouvoir fournir, après la mise en service de SPIRAL2 plusieurs faisceaux simultanés pour répondre à la très forte demande de faisceau.

SPIRAL2 permettra à la France d'acquérir de nombreuses technologies nécessaires à la construction d'EURISOL et ainsi d'être bien placée pour accueillir l'installation européenne EURISOL. En effet, LINAG sera le premier accélérateur linéaire de très haute intensité (5 mA pour les deutons, 1 mA pour les ions lourds) supraconducteur, technologie clé pour les accélérateurs du futur. Les sources ECR pour les faisceaux primaires utiliseront des technologies de pointe pour les ions multichargés. Enfin, le développement des ensembles de sources de production de grande efficacité avec de fortes contraintes sur les dispositifs de radioprotection permettra d'acquérir de l'expérience dans ce domaine-clé pour la production de faisceaux radioactifs.

Dans le contexte actuel de développement des collaborations européennes, compte-tenu de la complémentarité des énergies et des faisceaux de GSI et GANIL/SPIRAL/ SPIRAL2 et de l'expertise des équipes françaises et allemandes, il semble important de renforcer nos liens avec GSI. La communauté de structure nucléaire française est encore relativement peu impliquée à GSI, faute de moyens humains et financiers.

Des ensembles de détection performants doivent aussi être développés pour accompagner ces projets ambitieux qui délivreront aux physiciens des faisceaux variés sur une grande gamme d'énergie. Le projet AGATA alliant efficacité et granularité permettra les études de spectroscopie gamma des noyaux les plus exotiques. La R&D associée à ce détecteur implique des développements importants en imagerie nucléaire. En ce qui concerne la détection de particules chargées, deux voies sont actuellement explorées avec d'une part, des dispositifs de type télescopes

à base de Si à pistes, de Ge planaires et de CsI (GRAPA), et d'autre part avec le concept de cible active (ACTAR). Un nouveau spectromètre de recul de très haut pouvoir de réjection ($>10^{13}$) devra être construit pour les expériences utilisant les faisceaux stables de très haute intensité de LINAG. D'importants développements seront également nécessaires pour des détecteurs de faisceau adaptés aux faisceaux de SPIRAL2 et d'EURISOL. En ce qui concerne les cibles, on peut noter que les laboratoires français ont presque totalement perdu leur savoir-faire en termes de cibles minces, et le succès de certaines expériences de SPIRAL et SPIRAL2 dépendra de la capacité des instituts à reconstituer leur expertise dans ce domaine et à stimuler l'innovation pour le développement de nouvelles technologies de cible, en particulier cryogéniques. Il est également urgent de mettre en place une étude de cible polarisée, pour accéder aux observables de spin des noyaux exotiques, et déterminer l'interaction spin-orbite loin de la stabilité. Enfin la France doit s'investir dans le domaine des trappes, instruments indispensables pour nombre de mesures de haute précision et pour lesquels elle a pris un retard important et très pénalisant. Compte tenu des budgets et des moyens humains requis, la réalisation des instruments ne peut se faire qu'à l'échelle européenne, et en évitant les doublons. L'initiative d'EURONS est une première étape indispensable à la mise en place de collaborations européennes pour le développement de multi-détecteurs.

Moyens humains actuels et souhaités

La communauté française impliquée dans le domaine de Structure au drip-lines regroupe actuellement environ 75-80 physiciens. De nombreux physiciens sont impliqués dans différents domaines et peuvent donc être comptés dans différents sous-groupes. Le service des Aires expérimentales du GANIL regroupe environ une cinquantaine d'ingénieurs et techniciens. Le personnel technique des autres laboratoires est plus difficile à estimer : son temps de travail sur les projets de physique nucléaire est alloué par les comités scientifiques et techniques et il est donc amené à travailler pour plusieurs domaines de physique, et à sous-traiter une partie de ses tâches à des entreprises extérieures.

Malgré l'augmentation des activités, le projet SPIRAL2 pourra probablement être conduit et exploité avec les effectifs actuels. Un programme plus ambitieux et cohérent au niveau européen incluant une participation à GSI, nécessiterait une augmentation significative des effectifs, probablement de l'ordre de 20%.

Le développement du potentiel humain au niveau technique est d'une importance capitale vu la taille et la technicité des projets envisagés aussi bien en instrumentation qu'en systèmes accélérateurs. La faiblesse du nombre de théoriciens dans notre domaine doit être corrigée d'une manière urgente afin d'aboutir à l'objectif scientifique fixé pour les dix prochaines années.

Demandes d'investissements

Le budget demandé pour SPIRAL2 est de 100 Meuros (avec main d'œuvre), le coût des détecteurs envisagés représente 50 MEuros pour AGATA, 5 MEuros pour GRAPA, environ 5 Meuros pour un spectromètre de grande acceptance, une somme équivalente pour les développements de nouvelles cibles (ces coûts sont approximatifs et donnés sans la main d'œuvre). Rappelons que le financement de ces détecteurs sera européen et que la participation de la France ne représentera qu'une partie limitée du total, en particulier pour AGATA et GRAPA qui sont deux ensembles destinés à être exploités auprès des divers accélérateurs.

Estimation temps de faisceau

Les derniers comités d'expériences de GANIL ont enregistré une demande cumulée de faisceau 5 ou 6 fois supérieure au temps programmable. La situation est équivalente au GSI, et les équipes ont actuellement de graves difficultés pour mener à bien leur programme de recherche. Si la communauté dispose d'une installation multi-faisceaux avec GANIL/SPIRAL2 et garde une activité auprès d'autres installations, cette situation devrait s'améliorer dans l'avenir.

Structure et dynamique nucléaire : Collectivité, formes et appariement

L'objectif des physiciens de ce groupe de travail est de pousser le noyau dans ses derniers retranchements pour en tirer une meilleure connaissance de l'interaction forte qui lie entre eux les nucléons qui le composent, d'explorer l'organisation des nucléons et la cohésion des noyaux dans des conditions extrêmes de formes et de moments angulaires.

Motivations

La structure fondamentale du noyau peut être comprise grâce à l'identification et la caractérisation des états nucléaires en fonction de l'énergie d'excitation et du moment angulaire. Les questions concernant les formes que peut prendre un noyau et le comportement des nucléons, collectif ou individuel, à haut spin sont largement ouvertes. Les noyaux en rotation rapide peuvent changer de forme sous l'action des forces d'inertie qui s'exercent sur eux. En effet, lorsqu'il tourne à très grande vitesse, un noyau peut se déformer et adopter différentes formes puis en quelques milliardièmes de seconde, il se désexcite et récupère sa forme initiale quasi-sphérique.

L'étude du phénomène de super-déformation a permis un test primordial des différents modèles nucléaires théoriques dans des conditions extrêmes de déformation et de moment angulaire. Par exemple, les résultats obtenus sur le noyau super-déformé ^{36}Ar ont pu être expliqués par le modèle en couches et par les calculs de champ moyen tournant. Mais il subsiste de nombreux problèmes non résolus actuellement dans ce domaine. Cela nécessitera dans les années à venir des études poussées sur la recherche des liens entre états à haut spin pour déterminer l'énergie d'excitation, les spins et parités des états super-déformés, la population et la décroissance de ces états. La mise en évidence de nouvelles régions de noyaux super-déformés, en particulier dans les noyaux stables tels que ^{208}Pb (les calculs théoriques prédisent un minimum super-déformé dans ce noyau, exemple typique de noyau sphérique) et surtout de noyaux hyper-déformés, trois fois plus longs que larges, prédits par la théorie mais non encore observés expérimentalement, donnera accès à de nouveaux aspects de structure nucléaire : changement de la structure des couches, nouvelles fermeture de couches, nouvelles orbitales, coexistence de vibrations octupolaires avec excitations de particules, ...

Une question fondamentale en structure nucléaire est la détermination de la limite en moment angulaire qu'un noyau peut supporter et ces nouveaux phénomènes sont prédits à très haut spin ainsi que d'autres récemment mis en évidence. Le phénomène de chiralité est prédit dans les noyaux présentant une forme triaxiale stable avec des protons et des neutrons de valence occupant des orbitales particules et trous de haut spin. Des structures observées dans le noyau ^{134}Pr et ses voisins peuvent être interprétées comme des rotations ou des vibrations chirales et d'autres régions de noyaux sont prédites. Le mode "wobbling" correspond à un mouvement collectif caractéristique des noyaux triaxiaux. Il reste des questions ouvertes dans la compréhension de ce phénomène collectif de coexistence entre la rotation normale d'un noyau fortement déformé triaxial et des excitations de wobbling-phonons. Le nouveau mode d'excitation du noyau qu'est la rotation magnétique correspond à une brisure de symétrie du système nucléaire par la distribution de quelques excitations de particules et trous en-dehors du cœur sphérique ou quasi-sphérique.

A ultra haut spin, les noyaux subissent des rotations collectives et des excitations de particules jusqu'à une limite (terminaisons de bandes). Des questions restent ouvertes concernant le spin maximum que peut supporter un noyau et la disparition de l'appariement à très haut moment angulaire (60 et plus).

D'autres champs d'investigation à spin plus réduit et à basse énergie d'excitation vont connaître une expansion importante grâce aux nouveaux faisceaux radioactifs. Des premiers travaux ont comparé la valeur du gap d'appariement neutron dans la matière normalement et très déformée

dans une région de masse mais cette étude doit être étendue au gap d'appariement proton et à d'autres régions de masse de noyaux super-déformés et dans un futur plus lointain à la matière nucléaire hyper-déformée. Dans le domaine de la coexistence de formes, les états de basse énergie alimentés par désintégration β^- de noyaux riches en neutrons ou par excitation coulombienne de faisceaux radioactifs seront accessibles avec les nouvelles techniques et la variation du rayon de charge et du moment quadrupolaire de noyaux très exotiques seront obtenues par spectroscopie laser auprès des accélérateurs de faisceaux radioactifs. Dans ces dernières années, des calculs théoriques ont prédit l'existence de niveaux supérieurs de symétries : tétraédrale (pyramide) et octaédrale (diamant). La mise en évidence expérimentale de ces formes invariantes par de grands nombres d'opérations telles que réflexions, rotations, inversions, ... sera recherchée dans les années à venir.

Situation actuelle – contexte international

Les collisions entre ions lourds et en particulier les réactions de fusion-évaporation permettent de provoquer les vitesses de rotation les plus élevées que l'on puisse rencontrer dans la nature. C'est avec ce type de réactions induites par des faisceaux stables que ces études ont été menées jusqu'à présent dans le cadre de collaborations principalement européennes.

La désexcitation γ constitue une sonde primordiale pour l'étude de la structure du noyau dans des conditions extrêmes de forme et de moment angulaire et les premières générations de multidétecteurs de rayonnements γ , associés à des spectromètres de noyaux de recul et des détecteurs de particules chargées, ont permis les progrès obtenus dans la compréhension du comportement des noyaux à haut spin ces dernières années.

Projets futurs et besoins techniques (accélérateurs, instrumentation, ...)

Utiliser des faisceaux de noyaux riches en neutrons pour induire des réactions de fusion-évaporation va ouvrir de nouvelles possibilités d'investigation des états de haut spin des noyaux stables ou riches en neutrons de masses intermédiaires. L'excès de neutrons des noyaux du faisceau, comparé aux réactions avec faisceaux stables, va accroître la barrière de fission des noyaux composés et donc la probabilité de survie des états. Ainsi, les études à ultra haut spin deviendront réalisables dans les noyaux riches en neutrons puisque les neutrons supplémentaires vont engendrer une stabilité accrue par rapport à la fission. En approchant cette limite de très haut moment angulaire, de nouvelles formes très exotiques sont prédites comme devenant énergétiquement favorable.

Les réactions de fusion-évaporation utilisant des faisceaux radioactifs ou des faisceaux stables intenses seront les outils privilégiés pour produire ces noyaux à très haut moment angulaire. Pour induire ces réactions, les énergies des faisceaux doivent se situer autour de la barrière coulombienne (quelques MeV par nucléon). Actuellement, l'accélérateur SPIRAL délivre à la fois des faisceaux de noyaux riches et déficients en protons d'intensité moyenne. Dans le futur, des fragments de fission, donc des noyaux riches en neutrons, seront fournis avec des intensités comparables aux faisceaux stables actuels, tout d'abord à très basse énergie par ALTO puis accélérer à quelques MeV par nucléon par SPIRAL2 et enfin, dans un futur plus lointain, à plus haute intensité avec EURISOL. Certaines études de structure nucléaire à haut spin nécessitent l'utilisation de faisceaux de noyaux stables avec des intensités bien supérieures à celles disponibles actuellement afin de pouvoir observer des phénomènes de plus en plus rares dans un noyau à très haut spin.

En ce qui concerne l'instrumentation, des progrès spectaculaires sont attendus avec le développement de la nouvelle génération de multidétecteurs de rayonnements γ basés sur le principe du "tracking γ ". Ce spectromètre γ AGATA ("Advanced GAMMA Tracking Array") est en phase de Recherches & Développements dans le cadre d'une collaboration européenne. D'autres instruments

devront être développés dans les années à venir pour être associés à AGATA ou être utilisés seuls : des détecteurs de particules chargées permettant d'identifier très précisément la masse de ces particules, un spectromètre de noyaux de recul (type VAMOS) de très haut pouvoir de réjection et de grande acceptance. Tous ces instruments devront pouvoir supporter de très hauts taux de comptage en cas d'utilisation de faisceaux très intenses.

Moyens humains (physiciens, personnels techniques) et temps faisceaux

La communauté de structure nucléaire "haut spin", qui travaillait principalement avec le multidétecteur de rayonnements γ EUROBALL auprès de l'accélérateur de Legnaro puis du VIVITRON à Strasbourg, était l'une des plus importante en France pour la Physique Nucléaire. Les physiciens et ingénieurs s'impliquent actuellement fortement dans le développement des instruments, AGATA et détecteurs associés, ou à la définition des accélérateurs nécessaires aux recherches futures.

Afin de mener à bien ces développements puis la réalisation des expériences dans ce domaine, la communauté française devra retrouver les moyens humains précédents c'est-à-dire environ 40 personnes-an (physiciens expérimentateurs et théoriciens, ingénieurs et étudiants).

Les temps d'accélérateurs de faisceaux stables de haute intensité ou de faisceaux radioactifs nécessaires à ces études peuvent être estimer de l'ordre de 4 à 6 mois par an pour la communauté française et ses collaborateurs.

Structure et dynamique nucléaire : Matière, Noyaux, Transport et Transition

Les recherches entreprises dans notre thème sont au cœur des préoccupations actuelles sur la physique des phénomènes à l'équilibre et hors équilibre des systèmes transitoires de taille finie. La nature à double composante du fluide nucléaire donne à ce thème sa spécificité et son originalité dans le cadre plus général de la physique des systèmes finis. L'exploitation future de faisceaux radioactifs renforcera cette originalité.

Les outils incontournables de cette thématique sont des faisceaux adaptés (nature du projectile, énergie, extension isotopique) et des multidétecteurs de grande efficacité. Du contexte actuel on peut faire le double constat suivant pour ce qui concerne notre thème. Premièrement, la dernière décennie a vu la mise en fonctionnement de détecteurs très performants au GSI, au GANIL et en Italie. La synergie entre cette panoplie de moyens expérimentaux et des collaborations étroites avec les théoriciens a permis de prendre une avance notable sur les laboratoires et équipes américains. Plus particulièrement, le détecteur INDRA a permis à la communauté française d'enrichir la connaissance de la physique des collisions, de promouvoir des nouvelles idées sur la physique statistique des systèmes finis, d'acquérir une position incontournable, reconnue et enviée. Deuxièmement, les informations disponibles à l'heure actuelle n'indiquent pas que la communauté nord-américaine élabore une politique lui permettant de rattraper son retard et de se positionner favorablement dans la perspective des faisceaux délivrés par le futur accélérateur RIA. De ce double constat, on peut déduire que nous avons l'opportunité de suivre une stratégie qui confèrera à la communauté française et européenne une position dominante dans la problématique des transitions de phase dans les systèmes finis. Par conséquent, pour que l'exploitation des potentialités offertes par les faisceaux radioactifs d'EURISOL soit optimale dans le domaine couvert par la thématique MN2T, il est essentiel que notre communauté se dote d'un détecteur de produits chargés de troisième génération comme le concept FAZIA, et ce, avant que les faisceaux radioactifs d'EURISOL ne soient disponibles.

Les objectifs

Les collisions d'ions lourds aux énergies de Fermi, typiquement de 20 à 100 MeV/A, sont un outil majeur et indispensable à la physique nucléaire. Elles permettent entre autres, la mesure de grandeurs nucléaires fondamentales (viscosité, densité de niveaux, compressibilité, équation d'état) et l'étude des limites d'existence des noyaux soumis à des contraintes thermiques (température maximale) ou mécaniques (rupture et déformation dynamiques). Ces recherches ont des implications importantes dans d'autres domaines de la physique. Par exemple, les propriétés nucléaires influencent le déroulement de processus stellaires comme l'effondrement des étoiles à neutron ou l'explosion de supernovae. Enfin, les collisions d'ions lourds sont un moyen privilégié pour l'étude en laboratoire de la physique statistique, des transitions de phases et des comportements critiques des systèmes finis.

La *multifragmentation* (production multiple de fragments) est le signal phare de cette thématique. Ce processus serait une manifestation de la *transition liquide-gaz dans les noyaux* dont l'observation est un objectif primordial de la physique nucléaire moderne. L'importance de l'enjeu explique qu'une part significative de l'activité de la communauté française soit dédiée à l'étude de la multifragmentation. Elle fait partie de la recherche de base en physique nucléaire dans les grands laboratoires. L'ensemble de ces travaux est discuté par une large communauté dans le cadre du WCI

(World Consensus Initiative).

Pour préparer le phénomène de multifragmentation en laboratoire, l'outil idéal est les collisions d'ions lourds aux énergies de Fermi. La gamme en taille et énergie couverte par les faisceaux actuellement disponibles auprès du GANIL, permet d'imposer et de varier les contraintes dynamiques, condition *sine qua non* à la compréhension du processus de multifragmentation. Un programme scientifique vigoureux de la collaboration INDRA a permis une abondante moisson de résultats qui sont déterminants dans le débat actuel sur des sujets comme: *la physique statistique à l'équilibre ou hors équilibre des systèmes finis; les transitions de phases dans les systèmes finis; le processus d'agrégation dans le contexte nucléaire; le développement d'instabilités de surface ou de volume*. Une telle richesse résulte du développement de techniques d'analyse innovantes, de concepts novateurs et d'une interaction mutuelle et continue entre les théoriciens et les expérimentateurs. Ces avancées, qui placent la communauté française à un niveau d'excellence dans la compétition internationale, n'ont été possibles que grâce au multidétecteur INDRA. En effet, cette thématique exige des mesures exclusives et précises des fragments et particules produits lors des réactions. Les signaux de décomposition spinodale, de capacité calorifique négative, de bimodalité ou de fluctuations universelles du paramètre d'ordre de la transition n'ont pu être recherchés que grâce à la grande efficacité, à la granularité et aux seuils de détection et d'identification très bas du détecteur.

À partir de cet acquis, il est aisé de dégager les *axes futurs d'investigation de la thématique* durant la prochaine décennie: *contrôle des aspects dynamiques et des conditions d'observation de la multifragmentation; analyse croisée des conditions d'apparition des signaux de transition ou de criticité; exploration du degré de liberté d'isospin (rapport neutron-proton du noyau)*.

Les axes d'investigation

Les études récentes ont montré la persistance d'effets dynamiques importants dont les conséquences sur la multifragmentation doivent être contrôlées. La présence d'un fort mouvement collectif d'expansion radiale dans les collisions centrales, ou la brisure du col avec hiérarchie en taille dans les collisions périphériques sont deux exemples représentatifs de ces effets dynamiques. Pour progresser, *il faut évaluer les contraintes imposées par la dynamique de la collision sur les systèmes étudiés*. Le moyen naturel est de varier la taille des réactants, l'asymétrie de masse ou/et d'isospin des voies d'entrée. À cela, on peut ajouter les expériences de spallation à GSI (voir le document du groupe 2 Réactions Nucléaires de cette prospective) pour préparer des noyaux dans d'autres conditions dynamiques que dans les collisions noyau-noyau. On peut alors envisager :

- de spécifier les degrés de liberté des systèmes relaxés ou non (effets de mémoire) ; équilibration chimique (isospin), thermique (température), de déformation (surface).
- de préciser les effets de transparence et de milieu caractérisant les propriétés de transport à l'échelle microscopique (masse effective, libre parcours moyen, viscosité,...).
- de mesurer les profils de vitesse d'expansion qui, aux énergies de Fermi, peuvent s'écarter du régime de Hubble,...

Ces données sont *cruciales pour un contrôle précis des modèles de transport*. En effet, la complexité de cette physique basée sur l'exploitation des collisions, entraîne une *interconnexion très forte entre l'expérience et la théorie pour l'élaboration et la validation des modèles dynamiques d'une part, et l'interprétation des données expérimentales d'autre part*.

La multifragmentation est caractéristique du domaine des énergies de Fermi. La capacité à comprendre ce processus reflète le degré de connaissance de la physique des collisions dans ce domaine d'énergie. Durant la prochaine décennie, il sera important de préciser :

- les conditions d'apparition et de disparition de la multifragmentation,

- le phénomène de multifragmentation en lui-même,
- Le rôle du degré de liberté d'isospin.

Un aspect qui sera abordé concerne la *nature du lien entre mouvement collectif de matière et fragmentation*. Existe-t-il une relation de cause à effet entre mouvement collectif et multifragmentation ? La fragmentation résulte-t-elle d'une dégradation incomplète de l'énergie incidente ? Ou bien est-elle due à une limite de stockage thermique des noyaux ? Quel est le lien entre expansion et compressibilité ou encore entre expansion et répulsion coulombienne ? Existe-t-il un découplage entre les degrés de libertés thermiques et collectifs ? Les réponses à ces questions sont fondamentales pour valider notamment les scénarii de fragmentation (décomposition spinodale, fragmentation rapide hors équilibre,...). L'exploitation des données existantes devrait apporter des éléments de réponse, mais ces mesures devront être complétées. La comparaison de voies d'entrée de taille, de géométrie (périphériques vs centrales) et d'asymétrie (y compris en isospin) différentes sera utilisée. Dans cette panoplie on peut inclure les expériences de spallation à GSI. Enfin, la physique au seuil d'apparition (évaporation vers multifragmentation) et au seuil de disparition (multifragmentation vers vaporisation) sera examinée de manière systématique, en particulier la dépendance de ces seuils avec la taille du système. Peut-on également caractériser le passage au mode de vaporisation du système sous forme de particules légères, dans lequel on transforme toute l'énergie déposée dans le système sous forme du seul degré de liberté de translation (énergie cinétique)?

Il est maintenant acquis que la multifragmentation est un régime particulier de désintégration des noyaux nécessitant une modélisation différente de celle appliquée aux noyaux faiblement excités (évaporation, fission) ; dans certaines conditions, la multifragmentation serait le signal du passage du système dans la zone de coexistence liquide-gaz du diagramme de phase de la matière nucléaire. *La caractérisation de la dynamique du processus est alors nécessaire et différents scénarii seront explorés: développement d'instabilités de type spinodal; transition de type ordre-désordre; agrégation de nucléons vs fragmentation. Il faudra accompagner cette étude par une mesure des caractéristiques du système ainsi que des variables thermodynamiques (volume de freeze-out, température, potentiel chimique).*

Le développement d'outils spécifiques et de sondes adaptées a permis une accumulation de *signaux extrêmement encourageants pour la physique des transitions de phase des systèmes finis*. Ce sont: la *bimodalité* de la distribution du paramètre d'ordre, c'est à dire que la distribution du plus gros fragment présente une structure à deux composantes; la *production accrue des partitions* avec des fragments de même taille; une *large fluctuation* de l'énergie cinétique totale; des *lois d'échelles* dans les taux de production des fragments et dans les distributions du plus gros fragment. Ces signaux sont pertinents pour la transition liquide-gaz, la capacité calorifique négative, les comportements critiques, la transition ordre-désordre, la décomposition spinodale. *Les activités futures seront largement consacrées aux analyses croisées des conditions d'apparition de ces signatures de transition et de criticité. Cette démarche permettra de vérifier si ces signatures sont la réponse d'un seul phénomène ou de phénomènes d'origines différentes, car, dans l'état actuel des connaissances, rien n'impose un scénario unique.* Les outils d'analyse listés plus haut sont tous issus du traitement des systèmes finis qu'il a été nécessaire de développer pour *étendre les concepts standards de la thermodynamique*. L'intérêt de la thématique présente est la possibilité de tester en laboratoire les effets de taille finie. Cet aspect est crucial pour déduire les propriétés de la matière nucléaire (qui existerait dans les étoiles à neutrons) de celles des noyaux par application d'une correction d'échelle. Ainsi, les effets de taille finie qui, dans la problématique des transitions de phases, pourraient apparaître comme un handicap, deviennent un moyen de vérifier et valider les nouveaux concepts de physique statistique des systèmes finis.

Le troisième axe d'investigation portera sur le rôle du degré de liberté d'isospin (rapport neutron-proton) d'une part dans les problématiques décrites plus haut, et d'autre part dans l'étude de processus directement induits par la proportion de neutrons et de protons du fluide nucléaire. La composition isotopique influence la masse effective du nucléon dans le milieu, et par

conséquent la densité de niveaux, grandeur clé pour la désintégration des noyaux. De même la température limite que peut supporter un noyau dépend du rapport neutron-proton. *Les objectifs des recherches futures avec des faisceaux radioactifs seront de comprendre le lien entre l'isospin de la voie d'entrée et la distribution isotopique des produits finals; de mesurer l'équilibration en charge et le processus de diffusion d'isospin; de mesurer le terme d'asymétrie de charge de l'équation d'état; d'étudier le comportement des noyaux faiblement excités formés près des « drip-lines »; d'établir la dépendance en isospin du diagramme des phases et de la transition liquide-gaz.* En particulier, la théorie des transitions de phases des systèmes à deux composantes prévoit le phénomène de *distillation neutron-proton* induite par le développement d'instabilités chimiques, et les signatures de cette séparation seront recherchées. Un ensemble d'expériences clé dédiées à cette thématique est décrit dans le rapport EURISOL et le Physics Case de SPIRAL2.

Les outils

La vigueur de la thématique résulte de la conjonction de plusieurs facteurs: un support théorique puissant; un détecteur d'excellence; un accélérateur approprié.

Tout d'abord, il faut mentionner que notre thématique suscite et bénéficie d'un fort soutien théorique en Europe. Cette collaboration permet le développement de nouveaux modèles théoriques capables de décrire précisément la diversité des phénomènes présents dans les collisions aux énergies de Fermi et de prédire l'influence de l'isospin. Dans ce cadre, une base de données, de qualité inégalée jusqu'à présent, a été constituée et sera enrichie par les mesures futures. Cette compilation a d'ores et déjà attiré les théoriciens.

Du point de vue expérimental, *la problématique requiert un système de détection à la hauteur de l'enjeu.* L'expérience acquise auprès du détecteur INDRA montre que seul un projet ambitieux et adapté permet de gérer les informations complexes de cette thématique. Les spécificités d'INDRA ont donné l'accès à des phénomènes rares comme la vaporisation, ou permis des analyses sophistiquées comme celles des fluctuations universelles, deux résultats inaccessibles aux autres détecteurs, notamment ceux construits dans les laboratoires américains. Le multidétecteur CHIMERA permet des améliorations. Toutefois, pour aller plus loin et renforcer les potentialités d'études intra-événement, il convient de *gagner en granularité, de diminuer les seuils de détection, de mesurer précisément les distributions isotopiques sur une large gamme de fragments, de mesurer les vecteurs vitesses des produits libérés.* Ces améliorations sont également nécessaires pour mieux contrôler l'énergie dissipée dans la collision (via la mesure du couple cible projectile, ou la méthode de la calorimétrie), ou pour la mise en œuvre de techniques modernes de corrélations. *Le détecteur 4π de 3^{ème} génération indispensable apparaît être le concept FAZIA développé dans le rapport EURISOL auquel serait adjointe une détection 4π dédiée à la mesure des neutrons.* De plus il faut que dès sa conception, cet appareillage soit adaptable à d'autres installations.

Les faisceaux du GANIL et ceux de la campagne de GSI avec des faisceaux jusqu'à 100 MeV/A ont été un atout pour notre physique. *Cette panoplie en taille (de l'Ar à l'Au) et en énergie (de 20 à 100 MeV/A) est nécessaire.* L'utilisation des faisceaux secondaires de fragmentation à travers les appareillages SISSI ou LISE permettra de débiter le programme concernant l'isospin. *Il faut donc que la disponibilité des faisceaux du GANIL et la compétitivité des appareillages SISSI et LISE soit maintenue jusqu'à l'arrivée de faisceaux exotiques d'énergies équivalentes,* fournis par EURISOL et par une mise en œuvre rapide d'une option haute énergie de SPIRAL2-LINAG. Des expériences complémentaires pourront être menées à GSI avec des ions de $A < 60$ pour peu que les énergies des faisceaux délivrés par la machine soient adaptées à notre thématique. Il faut ici noter deux points très importants relatifs à notre thématique. Le premier, en liaison avec des systèmes finis : il faut faire varier la taille du système étudié en allant de la multifragmentation d'un projectile léger ($A < 60$ à haute énergie de bombardement) à celle d'un

système de fusion (A 400 aux énergies de Fermi). Le second, liés aux études de corrélations intra-événement qui ont déjà porté leurs fruits et qui seront décisives dans les progrès à faire. D'autre part, des expériences ciblées seront effectuées avec des faisceaux exotiques de SPIRAL. Enfin, il convient de mentionner que des collaborations (ISOSPIN, NUCL-EX) sont en place avec des physiciens italiens pour des expériences avec des faisceaux stables de 15 à 30 MeV/A.

La stratégie

La stratégie que nous souhaitons mettre en œuvre s'articule autour de quatre points:

- Poursuivre notre programme avec INDRA et notre collaboration scientifique avec les collaborations NUCL-EX et ISOSPIN.
- Débuter le plus rapidement possible, la conception mécanique et la construction d'un détecteur de 3^{ème} génération répondant à nos objectifs de physique : l'expérience acquise avec INDRA montre que quelques années sont nécessaires pour exploiter au mieux les données d'un nouveau multidétecteur.
- Engager l'axe de recherche sur l'influence de l'isospin et soutenir fortement le développement de faisceaux exotiques utilisables pour notre physique (option haute énergie de SPIRAL2-LINAG et EURISOL).
- Du point de vue de politique scientifique, notre stratégie a toujours consisté à une ouverture européenne. Cela se traduit, à ce jour, par des collaborations via le groupe de travail AZ4 π (Italie-France), les accords IN2P3-DSM/CEA-GSI (France, Allemagne) et les accords IN2P3-HH/IFIN (France, Roumanie).

Les moyens humains et financiers

Le multidétecteur européen de 3^{ème} génération FAZIA répondra à nos besoins (évolution du concept FAZIA décrit dans le document « instrumentation for EURISOL » et dont le principe a été appuyé par le rapport NUPECC 2004). Il permettra l'identification en A et Z indispensable pour le futur de la thématique et l'étude de l'isospin au voisinage de l'énergie de Fermi. Une détection 4 π des neutrons et des isotopes d'hydrogène de grande énergie lui sera ensuite ajoutée aux énergies EURISOL. La communauté soutenant cette construction est constituée de 55 physiciens issus de France (Fr: 30 %), d'Italie, de Pologne et de Roumanie. Le nombre de physiciens intéressés par l'utilisation de l'ensemble de détection est quant à lui plus large. La R&D pour l'électronique associée s'effectue dans un cadre européen général dont l'utilité dépasse notre thématique.

Un calendrier pour la construction du détecteur et son articulation avec les autres équipements pourraient être le suivant :

- 2005 : Rapport final du groupe de travail AZ4 π
- 2006-2007 : Début de la construction de FAZIA
- 2010-2011 : Premières expériences
- 201x -: salle de faisceau avec fosse « nH4 π » (neutrons et H) d'EURISOL.

Des études préliminaires pour établir le cahier des charges de cet appareillage ont débuté en 2001. Pour la période 2001-2004, les autorisations de programme fournies par l'IN2P3 se sont élevées à 112 Keuros. Pendant la même période l'INFN a mené des travaux de R&D complémentaires. L'ensemble est coordonné dans le cadre du groupe de travail franco-italien AZ4 π créé en 2001 et soutenu depuis 2002 par un PICS du CNRS. À partir de 2005 le financement de R&D couvrira une

partie des études d'électronique et de mécanique associées à la détection.

Le coût total de la réalisation (multidécteur + chambre à réaction + électronique et acquisition associée) est estimé à 8-9 MEuros

Pour ce qui concerne les physiciens français, 15 sont impliqués dans les études de R&D et le seront dans les différentes études et tests. L'équivalent de 6 ingénieurs à plein temps pour la mécanique, l'électronique et l'informatique doit, pendant la période de R&D, participer aux différents développements. Quatre techniciens équivalents plein temps seront chargés des tests de qualification et de réception des différents modules, de l'assemblage, du montage et participeront aux différents tests sous faisceau.

Actuellement, 24 physiciens permanents participent aux recherches abordées dans le thème Matière, Noyaux, Transport et Transition. Ils sont répartis dans cinq laboratoires français (SPhN/DAPNIA, GANIL, IPN Lyon, IPN Orsay, LPC Caen) et étrangers (NIPNE de Bucarest, INFN de Naples). Nous demandons quatre embauches de jeunes chercheurs et quatre embauches d'enseignants chercheurs. Cet effort est justifié par l'attractivité et l'interdisciplinarité du thème, et il est par ailleurs nécessaire pour assurer la relève des générations et le transfert de compétences.

Besoins en temps de faisceaux

Pour cette estimation, nous prenons comme base de calcul, les durées des campagnes de mesures effectuées avec INDRA. Typiquement 1 mois par campagne tous les deux ans. Dans le futur nous utiliserons des faisceaux stables et exotiques. Les expériences avec les faisceaux exotiques seront plus fortes consommatrices en temps, et les analyses futures demanderont plus de statistique. À cela il convient d'ajouter le temps nécessaire à la mise en fonctionnement progressive du futur détecteur. Pour ces différentes raisons, nous estimons nos besoins à environ à 1 mois de mise en route et 4 à 5 mois de mesures soit un total de 5 à 6 mois. Il est probable que la fréquence des expériences soit d'une campagne de mesures tous les deux ans.

Structure et dynamique nucléaire : Noyaux lourds et super-lourds

L'intérêt de l'étude des noyaux Super-Lourds (S-L) repose sur l'existence prédite théoriquement d'un îlot de stabilité. Rechercher de nouveaux éléments chimiques revient à répondre à des interrogations aussi fondamentales que : Quels éléments peuvent exister ? Qu'en est-il de leurs isotopes déficients et riches en neutrons ? Quel est leur temps de vie ? Quelles propriétés déterminent leur stabilité ? Comment peuvent-ils être synthétisés ? Ont-ils été synthétisés par la nature ? Quelles sont leurs propriétés chimiques ? Comment s'arrangent les électrons soumis au fort champ électrique du noyau ? Jusqu'à quel élément la classification de Mendeleïev est-elle valide ? La question sous-jacente est celle de l'équilibre des forces agissant à l'intérieur du noyau, résultant de l'interaction forte qui tend à lier les nucléons entre eux et de l'interaction coulombienne qui tend à repousser les protons les uns des autres, équilibre délicat perturbé, de plus, par les corrélations d'appariement et la force spin-orbite.

Les noyaux S-L ($Z > 104$) doivent leur existence à des effets microscopiques nucléaires faisant apparaître des surcroûts de stabilité. Ceci résulte en de forts effets de couche capables de vaincre les forces coulombiennes et de stabiliser le noyau vis à vis de la fission alors que les seules considérations macroscopiques (modèle de la goutte liquide) interdisent l'existence de noyaux possédant plus de 104 protons. Les nombres magiques de 2 à 82 étant communs aux protons et aux neutrons, la logique voudrait que la prochaine fermeture de couche en protons soit $Z=126$, analogue de $N=126$ connue pour le ^{208}Pb . Mais depuis les années 60, des calculs microscopiques-macroscopiques (approche de Strutinsky) ont conduit à envisager $Z=114$ et $N=184$, tandis que d'autres calculs (Hartree Fock Bogolyubov -HFB- et champ moyen relativiste -RMF) prédisent que l'îlot se répartirait sur une région centrée sur $Z=120$ ou $Z=126$.

La méthode la plus favorable pour synthétiser des S-L en laboratoire a été jusqu'à présent de former des résidus d'évaporation après des réactions de fusion avec des cibles lourdes. Ces résidus d'évaporation sont ensuite séparés du faisceau incident et identifiés après implantation dans des détecteurs sensibles en position. L'identification des noyaux se fait par la détection de la chaîne de décroissance reliant un noyau connu au résidu S-L produit dans la réaction. Récemment, des éléments jusqu'à $Z = 118$ ont été ainsi synthétisés par fusion chaude à Dubna. La confirmation de la synthèse de ces éléments reste cependant à réaliser rapidement.

La **synthèse** d'éléments plus lourds nécessite à moyen terme des développements techniques (séparateurs, cibles, détection) et l'accessibilité à de nouveaux faisceaux (stables de haute intensité et radioactifs). Les méthodes chimiques d'identification ainsi que le piégeage des résidus d'évaporation semblent incontournables pour ces études et doivent également être développés. A long terme, bénéficiant de ces apports techniques, l'accès aux noyaux S-L ($Z=120/126$ $N=184$) est envisageable par des systèmes tels que (^{238}U (^{82}Se , xn) $^{320-xn}_{194}126$, ^{232}Th (^{86}Kr , xn) $^{318-xn}_{192}126$).

A plus court terme, les études conjointes de **structure nucléaire** et de **mécanismes de réaction** vont apporter des informations essentielles. Les dispositifs actuels permettent d'étudier la structure des éléments SL jusque $Z \sim 104$, et de comprendre son influence sur la stabilité, c'est-à-dire, connaître les formes et/ou leur période de décroissance. L'évolution de ces caractéristiques avec le nombre de neutrons pour des éléments de $Z < 105$ sera sans doute mesurée. Diverses méthodes (spectroscopie alpha, gamma et électron, excitation Coulombienne, piégeage d'ions) permettent d'accéder aux caractéristiques des S-L (spin, parité, premiers états excités, moments quadripolaires, barrières de fission, masses).

L'étude des mécanismes responsables de la formation et de la survie des éléments S-L ainsi que la modélisation de ces mécanismes doivent être poursuivies et affinées. La preuve de

l'existence d'un îlot de stabilité et son identification seront obtenues par des mesures directes de temps de fission caractérisant la stabilité des éléments formés par fusion. Afin de prouver l'existence ou non d'un îlot de stabilité, il est nécessaire de s'approcher de cette région en produisant des noyaux de plus en plus lourds en protons et en neutrons. Il est également indispensable de quantifier et de comprendre les processus, tels que la quasi-fission, les compétitions quasi-fission/fusion-fission ou fusion-fission/fusion-émission de particules (neutres ou chargées). D'autre part l'influence de la structure des partenaires et de la dynamique de la collision (symétrie, influence des couches fermées, isospin) doit être étudiée dans le cas du mécanisme de fusion-évaporation afin de favoriser la formation et la survie des résidus S-L.

Synthèse des éléments S-L

Jusqu'à ce jour, deux voies de réaction ont progressé avec succès vers l'îlot de stabilité prévu pour les S-L. La fusion froide utilise un projectile léger et une cible de plomb ou bismuth. Les éléments produits (jusqu'au $Z=112$ en 1996 à GSI) sont identifiés en Z et A grâce à leur chaîne de décroissance α qui se termine par des éléments connus. Cette méthode d'identification non ambiguë se heurte à deux difficultés :

- La systématique montre que la section efficace chute d'un facteur 10 lorsque le numéro atomique augmente de 2. Pour progresser au delà du 114, des nouvelles installations plus efficaces sont nécessaires.
- La méthode d'identification par décroissance α ne permet de valider que des isotopes pauvres en neutrons qui se terminent par des isotopes connus.

Parallèlement, la fusion chaude produit, en utilisant une cible d'actinide, des noyaux plus riches en neutrons. Les résultats obtenus à Dubna montrent des sections efficaces entre 5pb et 0,1pb pour les éléments du 112 jusqu'au 118. Par contre, leur identification reste ambiguë car la chaîne de décroissance des noyaux produits se termine par des éléments inconnus.

Validation des résultats via la fusion chaude obtenus à Dubna

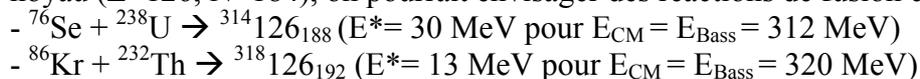
Les résultats obtenus en fusion chaude sont intéressants, mais ils doivent être validés dans un autre laboratoire ou via une autre méthode de production. Il est donc fondamental:

- dans un premier temps de confirmer les résultats de Dubna, en reproduisant les réactions à l'identique et en identifiant directement les résidus d'évaporation par une méthode alternative,
- dans un second temps d'améliorer ces données, en multipliant les événements, ce qui permettrait de mesurer leurs masses directement en utilisant un piège à ions, par exemple.

Le premier point peut débiter à court terme en parallèle avec le développement d'outils d'identification. Une des possibilités d'identification serait de faire la chimie des fils de l'élément synthétisé. Par exemple, la troisième filiation de l'élément 114 correspond à l'élément 108, dont la chimie est bien connue. A plus long terme, on peut estimer à un minimum de 3 mois le temps de faisceau nécessaire sur une installation à très haute intensité (avec un taux d'événements multiplié par 10 par rapport aux équipements actuels), pour compléter ces validations. Le second point demande plusieurs années.

Vers l'îlot de stabilité

Le but ultime de la synthèse des éléments S-L est d'atteindre l'îlot de stabilité. Pour atteindre le noyau ($Z=126$, $N=184$), on pourrait envisager des réactions de fusion complète telles que :



Aux masses estimées près, ces réactions sont énergétiquement possibles même si, malgré la relative « stabilité » de ces noyaux, leurs sections efficaces sont sans doute extrêmement faibles.

Quelle que soit la manière d'y parvenir, progresser vers ce but implique en premier lieu des intensités de faisceau très importantes, des temps de faisceau très longs, ainsi que les installations spécialisées et dédiées à ces mesures : cibles résistantes à la chaleur, outils de réjection du faisceau puissants et détection rapide.

Identification des S-L

Comme pour la fusion chaude, le rapport N/Z élevé de l'îlot rend inadéquate l'identification des noyaux par décroissance alpha : la continuité entre des noyaux connus et l'îlot ne peut être assurée. Il est nécessaire de développer de nouvelles méthodes d'identification directes en Z et A des noyaux créés afin d'ôter toute ambiguïté : pièges à ions, spectromètres temps de vol, calorimètres haute-résolution, spectroscopie laser et pour les noyaux ayant un temps de vie « long » (~1 min), les techniques chimiques d'identification. Ces méthodes devront être testées sur des « S-L légers » connus et peuvent être développées dans le cadre du programme S-L au GANIL.

Nouvelles voies pour les S-L

L'intensité des faisceaux riches en neutrons progresse (SPIRAL2 et EURISOL). Ils peuvent devenir à terme utilisables, dans une première étape, pour la synthèse de nouveaux isotopes de « S-L légers ». Des études de mécanismes restent à faire pour montrer l'influence du nombre de neutrons sur les sections efficaces de production. Couplés avec la chimie, ces nouveaux isotopes peuvent aider à l'identification des noyaux manquants dans la carte des nucléides.

La fusion par voie symétrique offre des opportunités certaines pour la synthèse de certains isotopes. Elle est également intéressante pour l'étude du rôle du paramètre d'asymétrie de masse du système. Il est certain que les études de synthèse se couplent très bien avec les études spectroscopiques et celles des mécanismes de réaction.

Structure des noyaux lourds et super-lourds

Les sections efficaces de production des noyaux transfermium sont suffisamment élevées pour permettre d'effectuer des études détaillées de spectroscopie. Leurs objectifs sont :

- déterminer les orbitales responsables de la configuration de tels noyaux et leurs propriétés.
- étudier la collectivité des noyaux, en particulier la déformation autour des îlots de déformation (^{254}No et ^{270}Hs).
- déterminer la masse des noyaux.
- estimer les barrières de fission.

Les modèles de champ moyen de type HFB ou RMF permettent de calculer ces quantités, mais d'importants désaccords sont constatés. Les études expérimentales doivent donc apporter de fortes contraintes, afin de mieux prédire les propriétés des noyaux super lourds. Cette étude, autour de la zone très lourde, aidera, par exemple, à déterminer le prochain nombre magique en Z, qui peut être Z = 114, 120 ou 126, dépendant des modèles.

Moyens existants ou en cours de développements

Deux techniques complémentaires sont utilisées :

- spectroscopie gamma ou électron prompt. Ces études sont actuellement effectuées à l'Université de Jyväskylä (spectroscopie gamma et électron, RITU, Sacred, Jurogam). Un projet est en cours d'étude à Dubna, avec comme spécificité la possibilité d'utiliser des cibles radioactives ainsi que l'utilisation d'électronique digitale autorisant des intensités de faisceau élevées (spectroscopie alpha, Dubna-ball, Vassilissa). Des études à l'aide de Vamos, d'Exogam ou d'un spectromètre électron au GANIL sont envisagées.
- Spectroscopie électron et gamma après décroissance alpha. Les expériences sont réalisées à Jyväskylä (RITU, Great), à Ganil (LISE), et prochainement à Dubna.

Avec les dispositifs actuels, l'étude de noyaux au delà de $Z \sim 104$ n'est pas réaliste. Sans développements innovants, une saturation des études est à craindre d'ici 5 ans.

Projets à moyen et long terme

Des progrès sont possibles en améliorant l'efficacité des dispositifs de détection et en utilisant les accélérateurs actuels (GANIL, Dubna et Jyväskylä):

- nouveau spectromètre de très grande acceptance (transmission supérieure à 70%) et de très bonne rejection (supérieure à 10^{12}); MASHA.
- spectromètre gamma de haute efficacité et granularité autorisant de très hauts taux de comptage : AGATA
- dispositifs expérimentaux associant des spectromètres électron et gamma.

La disponibilité de faisceaux radioactifs intenses (SPIRAL 2 puis EURISOL) permettra d'explorer de nouvelles régions s'approchant de l'îlot de stabilité ou de la zone des noyaux déformés autour de ^{270}Hs . L'utilisation de faisceaux de très haute intensité (y compris d'isotopes rares) doit s'accompagner de développements des cibles adéquates et systèmes associés. L'utilisation de cibles radioactives doit se généraliser.

De nouvelles techniques doivent également être explorées : mesure de moments quadrupolaire après fusion en cinématique inverse ou par mesure de temps de vie (avec l'utilisation d'un plunger ou d'un plunger d'états de charge) ; spectroscopie laser ; mesure de masse à l'aide de pièges ; mesure de barrière de fission par réaction (d,p) en cinématique inverse.

Expériences type

- Mesure du spin et de la parité de l'état fondamental et d'états excités dans des noyaux fermium impairs, par spectroscopie alpha, électron et gamma.
- Mesure de moment quadrupolaire de ^{254}No par excitation coulombienne, mesure de temps de vie, mesure de distribution d'états de charge ou spectroscopie laser.
- Spectroscopie gamma et électron prompt de ^{270}Hs .
- Mesures de masse à l'aide de pièges ou de spectromètres efficaces et très sélectifs.

Mécanisme et dynamique de réaction

Le succès rencontré ces dernières années dans la synthèse des éléments S-L à la fois à Dubna et à Darmstadt ne doit pas faire oublier les nombreuses lacunes existantes dans ce domaine de recherche. En effet, les différents mécanismes responsables des faibles sections efficaces de fusion, en particulier la quasi-fission, ne sont pas bien compris. De même, la compétition entre fission et survie du noyau composé n'est pas bien maîtrisée.

Un des problèmes les plus épineux dans ce domaine de masse est la compétition entre quasi-fission et fusion-fission. En effet, ces deux mécanismes mènent à des observables très similaires et sont très difficiles à discriminer expérimentalement. Les caractéristiques des fragments ne permettent pas cette distinction. La différence la plus marquée entre les deux processus réside probablement dans les temps de vie des deux systèmes composites, la quasi-fission ayant un temps de vie beaucoup plus court que la fusion-fission à cause de trajectoires différentes suivies sur la surface d'énergie potentielle.

Du point de vue théorique, si la plupart des modèles s'accordent à prédire ou à reproduire les sections efficaces de capture et de formation du résidu d'évaporation, ils divergent de plusieurs ordres de grandeur dans la description des étapes intermédiaires qui mènent à la synthèse. Il apparaît donc indispensable d'apporter des contraintes expérimentales fortes à ces modèles qui comportent tous un grand nombre de paramètres.

Si les avancées récentes, mesures directes des temps de réaction par la technique d'ombre dans les monocristaux et distributions des neutrons de pré-scission par backtracing,

permettent vraisemblablement de réaliser une discrimination expérimentale entre fusion et quasi-fission, il n'en reste pas moins vrai que des contraintes supplémentaires sont indispensables pour obtenir une modélisation fiable de ces réactions. Il s'agit principalement de mesurer les probabilités de fusion ainsi que les probabilités de survie en fonction de la voie d'entrée (asymétrie, isospin, énergie d'excitation, moment angulaire, effets de couche, ...). L'importance des aspects dynamiques, longtemps ignorés, est maintenant bien établie. Cependant la nature et l'amplitude de la dissipation (aussi bien dans la voie d'entrée que dans la voie de sortie), sa dépendance avec la température et la déformation sont toujours sujettes à controverse. L'évolution dynamique des effets de couche reste également à préciser.

Au cours des années à venir, les temps de fission des éléments S-L seront mesurés de façon directe en fonction de leur charge, masse et énergie d'excitation par la technique d'ombre dans les monocristaux, permettant ainsi une localisation précise en Z et A de l'îlot de stabilité par un fort allongement des temps de fission. Les paramètres déterminant la compétition fission/évaporation seront affinés pour les noyaux très lourds et S-L grâce à la détermination de la chronologie d'émissions des particules par la technique de fluorescence X, une technique de mesure directe de temps complémentaire à la technique d'ombre dans les monocristaux.

Ces mesures de temps devront être associées à des mesures précises des distributions angulaires, des caractéristiques cinématiques (énergie, masse, charge, angle) des fragments de fission et des propriétés des particules de pré et de post-scission. Les corrélations entre les diverses observables permettront d'obtenir par backtracing les distributions des paramètres physiques décrivant l'évolution des systèmes. L'exploitation de telles données devrait permettre de répondre aux diverses questions encore objets de controverse et d'apporter un pouvoir réellement prédictif aux modèles en cours de développement. L'information gamma a été peu exploitée jusqu'ici. Les investigations portant sur l'excitation des résonances géantes, la multiplicité ainsi que l'énergie totale emportée par les gammas devraient constituer d'autres outils permettant la discrimination entre quasi-fission et fusion-fission. En particulier, l'influence de la déformation des partenaires en présence pourrait être mise en évidence. Des expériences visant cet objectif sont en cours de réalisation. Eventuellement, l'accès simultané aux différentes informations s'avèrera nécessaire. Dans ce cas, l'utilisation d'un multidétecteur très performant sera indispensable.

Les ressources actuelles (hommes, faisceaux, détecteurs) permettent à court terme la poursuite des expériences en cours ou déjà envisagées au GANIL, à Legnaro et à Dubna concernant la compétition quasi-fission/fusion. Ces études réclament de l'ordre de 3 mois faisceau/an et nécessiteront 4 à 5 campagnes sur les différents sites. Les expériences visant à obtenir précisément les distributions de masse et de Z réclameront l'accès à VAMOS et à EXOGAM.

A moyen terme, la disponibilité des faisceaux radioactifs (SPIRAL II, DRIBS II, GSI) permettra l'étude de l'influence de l'isospin dans la voie d'entrée et l'accès à une zone de masse plus étendue. A plus long terme, des faisceaux stables intenses rendront possibles des synthèses actuellement hors d'atteinte pour des raisons évidentes de sections efficaces et permettront donc également l'accès à des zones nouvelles. L'ensemble de ces programmes demandera le développement de moyens de détection adaptés, particulièrement pour les neutrons, particules chargées et gammas.

Sommaire, programme, développements et moyens

Les questions sur l'existence d'un îlot d'éléments S-L, la simple recherche de nouveaux éléments chimiques, la structure des noyaux très lourds et les implications relativistes de la chimie dans la zone d'éléments extrêmement lourds sont des questions d'actualité auxquelles nous n'avons toujours pas de réponses précises. Les moyens théoriques et expérimentaux se trouvent *principalement* en Allemagne, Russie, Japon, Finlande, Etats-Unis et France. Au vu de l'importance de ce sujet, la communauté scientifique autour de ce thème n'est pas très grande. L'effort

scientifique international peut s'estimer à environ une centaine de physiciens-an permanents et le budget d'investissement des dernières années n'est pas, non plus, très important. Nous l'estimons à environ 2M à 3Meuros par an depuis 10 ans. Les questions abordées par ce sujet scientifique se résument principalement aux quatre points :

1. Synthèse et identification de S-L
2. Spectroscopie de noyaux lourds et S-L
3. Mécanismes de réaction liés à la synthèse des éléments lourds et S-L
4. Chimie et techniques d'identification des éléments lourds et S-L

Les quatre thèmes bénéficient partiellement des mêmes outils expérimentaux, tout étant reliés entre eux.

A présent et avec les techniques et outils disponibles dans les différents laboratoires, nous pouvons prévoir la poursuite des activités dans ce domaine pour environ 5 ans. Ces activités seront poursuivies principalement sur les activités autour de :

- Thème 2 – Spectroscopie – pour la partie moins exotique, jusqu'à l'élément 104.
- Thème 3 – Mécanismes de réaction
- Thème 4 – Chimie – aussi pour des éléments moins exotiques, jusqu'à l'élément 112.

Il faut noter que, concernant la chimie des éléments lourds et S-L, nous n'avons pas identifié une communauté active, ce qui est d'une certaine façon regrettable pour le développement de ce thème en France.

La réalisation du thème 1 est fortement conditionnée par les progrès réalisés et les nécessaires études préalables effectuées grâce aux thèmes 2, 3 et 4.

L'avenir de cette discipline passera certainement par une évolution des moyens expérimentaux et théoriques à savoir :

- Tout d'abord, l'amélioration des performances des séparateurs actuels puis le développement de nouveaux spectromètres et séparateurs, avec une meilleure acceptance (>70%) et une plus grande réjection des faisceaux incidents (>10¹²).
- Le développement de nouveaux accélérateurs avec une intensité de faisceaux stables et radioactifs d'un à deux ordres de grandeur supérieure aux intensités disponibles actuellement.
- Le développement de nouvelles cibles supportant des intensités supérieures à celles actuelles et la construction d'un laboratoire de cibles radioactives.
- Le développement de nouveaux détecteurs (par exemple AGATA), et d'électronique numérique afin d'identifier des décroissances et d'effectuer de la spectroscopie de toutes sortes (alpha, gamma et électron).
- Le développement des nouvelles techniques de chimie rapide.
- L'implantation de pièges d'ions derrière les séparateurs, afin d'avoir une identification non ambiguë des masses synthétisées et d'effectuer de véritables mesures de masse (énergie de liaison) des noyaux. L'association d'un piège de Paul et d'un laser devra permettre de mesurer les déformations (jusqu'aux ordres élevés) avec une grande précision.
- Le développement de nouveaux détecteurs de neutrons, principalement pour les questions liées au mécanisme de réaction.
- L'amélioration des modèles de dynamique de réaction, afin de mieux comprendre les mécanismes et avoir un meilleur pouvoir prédictif des sections efficaces de synthèse des noyaux S-L.

Afin d'avoir une contribution significative de la communauté française dans ce sujet de physique, nous estimons un effort équivalent à environ 30 hommes-an (physiciens permanents, ITA et étudiants). Il est envisageable de projeter un budget de 400 keuros par an pour l'équipement des expériences auquel s'ajoute la construction d'un spectromètre (~5Meuros). Le budget n'inclut pas la construction d'un accélérateur dédié pour cette physique. Nous considérons que le temps de faisceaux stables ou radioactifs nécessaire pour cette physique est d'environ 4 mois/an pour la

synthèse des éléments super-lourds et de 3 mois/an pour les études de spectroscopie et de mécanismes de réactions dans la région d'intérêt.

References :

1. P. Armbruster, "On the production of superheavy elements", C.R. Physique 4 (2003), pages 571-594
2. R-D. Herzberg. Journal of Physics G 30 (2004) R 123
3. Ch. Theisen. Des noyaux lourds aux super-lourds. Ecole Joliot Curie 2002.

Structure et dynamique nucléaire : Réactions nucléaires

Motivation

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 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

Les thèmes abordés sont :

- 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 (Facility for Antiproton and Ion Research), GANIL/SPIRAL-SPIRAL2 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.

Besoins pour la réalisation des projets de ce programme

En personnel

Expériences au GANIL :

- 8 physiciens sur la durée du projet
- développements techniques : 20 hommes.an

Expériences de canalisation (GANIL & GSI) :

- 14 physiciens sur la durée du projet

Expériences de spallation (GSI) :

- 8 physiciens sur la durée du projet
- développements techniques : 40 hommes.an
-

Budget prévisionnel

Expériences au GANIL :

- Détecteur multi- trace : 1 M€ (investissement), fonctionnement : 30 k€/an

Expériences de canalisation (GANIL & GSI) :

- Réalisation des dispositifs expérimentaux : 200 k€ (investissement + fonctionnement)

Expériences de spallation (GSI) :

- Nouvelle cible d'hydrogène : 100 k€ (investissement)
- Détecteur multi- trace : 1 M€ (investissement)

- fonctionnement : 50 k€/an

Faisceaux nécessaires

Expériences au GANIL : 2 mois de faisceaux exotiques sur les cinq premières années

Expériences de canalisation (GANIL & GSI) : 3 mois de faisceaux stables sur la durée du programme

Expériences de spallation (GSI) :

- Faisceaux stables (^{136}Xe , ^{208}Pb et ^{238}U)
- Énergie : 0.5 - 1 A.GeV
- Faisceau continu, de faible intensité, environ 1000 ions/s
- Temps de faisceau approximatif (y compris les tests) : 6 mois, sur 4 ou 5 années

Structure et dynamique nucléaire : Interactions fondamentales

Abstract: Through beta decay, the nucleus provides a laboratory for studying fundamental interactions and symmetries. At the IN2P3, such studies are pursued at low energy nuclear physics facilities by two approaches: measuring super-allowed beta transition properties (by mass spectrometry and nuclear spectroscopy) and measuring correlation observables (by looking at the kinematics of the decay). The physics is briefly described and a *résumé* of the experimental effort (investment and manpower) currently dedicated to this work is made.¹ A projection for the continuation of this work - as well as other possible (related) orientations is then given.

Introduction

The Standard Model of particle physics provides the theoretical framework in which the electromagnetic, weak, and some aspects of the strong interactions can be described to considerable precision - in a single, coherent picture using baryons, leptons, and three families of quarks. Baryon number is conserved in the Standard Model and several lepton number conservation laws also hold.

The protons and neutrons (i.e., baryons) constituting the nucleus are composed of quarks whose interactions are mediated by bosons. Leptons, governed by the weak interaction, are insensitive to the strong interaction. However the quark mass eigenstates are not identical to the weak eigenstates but rather formed by mixing, the composition of which is determined by the Cabibbo-Kobayashi-Maskawa matrix.

An excellent description of the relation of the Standard Model and underlying forces and symmetries to nuclear physics, can be found in the report of the NuPECC Long-Range Plan Report 2004: Chap 5. *Fundamental Interactions*: (http://www.nupecc.org/lrp02/long_range_plan_2004.pdf)

Since the strong interaction is not completely described (nor understood) in the context of the Standard Model, it is the underpinning electroweak sector that must be used to probe its speculative extensions and eventually, for new physics which ought to lie beyond.

Within the IN2P3, two particular axes of research related to nuclear physics (or associated techniques) are pursued with the goal of testing the Standard Model and searching for new physics (note: this document concerns low-energy nuclear experiments associated with the beta decay of short-lived nuclides and NOT quasi-stable species that are candidates for e.g., double-beta decay).

Nuclear structure for testing standard model: Superaligned beta decay

The unitarity condition of the CKM matrix implies that $V_{ud}^2 + V_{us}^2 + V_{ub}^2 = 1$. V_{ud} , determined from the weak interaction vector coupling constant divided by that of the muon, has the highest weight. A result of over 100 independent measurements, it is in fact the most precisely known: 0.9740(5).

Beta decay has two components depending on the angular momentum of the emitted particles: Gamow-Teller and Fermi. For pure Fermi decays, the initial and final decay states have the same angular momentum and in the special case where there is no change in isospin is called a

¹ Note that the study of fundamental interactions pursued by phenomena such as double-beta decay (the NEMO experiment, for example) are covered by a different working group.

superallowed transition . Such decays are found along the $N=Z$ line and are especially interesting since the Matrix element for this type of decay M_F becomes trivial and the vector coupling constant G_V is very easily extracted from the comparative half-life, or so-called ft value (where f is a statistical rate function and t is the half-life of the transition).

$$ft = K / G_V^2 < M_F >^2 + G_A^2 < M_{GT} >^2 \text{ where } < M_F >^2 = T(T+1) - T_Z T_{Zf}$$

where K is a product of fundamental constants, so that for superallowed decays $M_F = 2$ and $M_{GT} = 0$.

However (would that life were so simple), since the transformation of an up-quark to a down-quark takes place within the nuclear volume, certain corrections are required. Two of these are radiative and calculated from QED arguments. One, the so-called Coulomb correction δ_C , requires a microscopic nuclear physics calculation. Because of the difficulties of such calculations, δ_C is the main focus and in fact, the undermining element in this game.

In order to evaluate ft , three experimental quantities are required: the half-life of the transition, the branching ratio (sometimes very small), and the Q -value of the decay. Since beta-spectroscopy is unable to determine the Q -value with the necessary precision, direct measurements (using Penning traps) of the parent and daughter nuclide are required. Note that f depends on the Q -value to the fifth power.

A recent review on Mass Measurements has recently been published by D. Lunney, J.M. Pearson and C. Thibault in Rev. Mod. Phys 75 (2003) 1021.

Complementing superallowed beta decay for deriving the vector coupling constant are neutron decay and pion decay. The former has the great advantage that there is no nucleus, hence no nuclear structure considerations for extricating the matrix element. On the other hand, neutron decay is a mixture of GT and Fermi transition, requiring an added experiment to determine the two contributions. The later, being a pure Fermi transition, avoids this particular problem however the branching ratio for the decay in question is only 10^{-8} ! Nonetheless, these three types of contributions have now resulted in a deviation from unitarity of more than two standard deviations.

For a recent discussion of the nuclear data and the status of the subject see J.C. Hardy and I.S. Towner in J. Phys. G Nucl. Part. Phys. 29 (2003) 197.

Beta decay kinematics: correlation parameters and search for new physics

The general description of the weak interaction at low energies involves different types of Lorentz invariants corresponding to vector (V), scalar (S), axial-vector (A) and tensor (T) interactions. As yet, only vector and axial-vector interactions have been observed and as such, only those have been incorporated into the Standard Model. Pure Fermi decays are sensitive to the V and S interactions and pure Gamow-Teller decays are sensitive to the A and T. These interactions can be probed by observing different types of correlations between the spins and momenta of the particles involved in the decay process. The comparison of precision correlation measurements with predictions made within the SM can provide access to physics *beyond* the Standard Model, as manifested by scalar and tensor interactions.

The coefficients which characterize the correlations between the kinematic vectors of the decay can probe interactions having different properties with respect to space and time transformations. For instance, the search for mechanisms inducing deviations from maximal parity violation requires precision measurements of pseudo-scalar quantities like the beta-asymmetry coefficient, A or the beta longitudinal polarization, P_L , or still combinations of these. On another

side, searches for new sources of T-violation can be performed by measurements of triple correlation terms appearing in the decay rate function. So far only the terms driven by the parameters D or R have been measured in a very limited number of transitions: the neutron, ^8Li and ^{19}Ne . A coefficient which is sensitive to all kinds of contributions, whatever the parity and time-reversal transformations is the beta-neutrino angular correlation, a . This coefficient has been measured in the past in several transitions and the results provide the experimental foundation for the $V-A$ nature of the weak interaction.

A review describing the sensitivities of the different correlation and the present status of precision measurements will appear in Rev. Mod. Phys., by N. Severijns, M. Beck and O. Naviliat-Cuncic.

Current Situation

At present, three IN2P3 labs (CENBG, CSNSM, IRES) are involved in superallowed beta studies and one (LPCC) pursues correlation measurements. The CSNSM has a strong tradition in mass spectrometry having completely developed instruments and established experimental programs as well as the atomic mass table - a global evaluation (and not *compilation*) of world data. Both CENBG and IRES have developed pioneering techniques in spectroscopy and detection techniques with both labs having active experimental and developmental programs. LPCC has developed a unique tool based on a transparent Paul trap surrounded by detectors with the aim to reconstruct the decay kinematics. The LPCC participates also in precision measurements of a time reversal violating correlation in the decay of free polarized neutrons. A summary is given in the following tables.

SUPER-ALLOWED BETA DECAY PROPERTIES				
Lab	Activity	Experiments	Facility	Manpower
CSNSM	High precision mass Measurements and Global mass evaluation	^{74}Kr , ^{74}Rb (2003) ^{62}Ga , ^{62}Zn (2004) ^{22}Mg (2004)	ISOLDE	2 DR, 1 CR, 1 EC, 2 doc
IRES	Nuclear structure N=Z	^{62}Ga (2004)	ISOLDE, GANIL	2 CR, 1 EC, 1 doc
CENBG	High precision half-live measurements	^{62}Ga (2003)	GANIL, JYFL	1 DR, 2 CR, 1 EC, 1 doc
IPNO	Calculation of Coulomb correction			1 DR, 1 CR
IPNL	Mean-field calculations N=Z			1 EC
BETA-DECAY CORRELATIONS				
Lab	Activity	Experiments	Facility	Manpower
LPCC	Beta-neutrino correlation from decays of trapped ions	^6He (2004-2005)	GANIL	4 EC, 1 DR, 1 CR, 2 doc
LPCC	Search for new sources of T-violation, transverse beta polarization measurements	Cold neutrons (2004-2005)	PSI	2 EC, 1 doc

Prospectives

Progress in this field must be made at both the theoretical and experimental level. Concerning measurements there are two complementary directions: the present superallowed data set must be extended to higher mass number and have the precision improved. Extending the data set requires not only an improvement in production technique, but also in instrumentation since the heavier superallowed beta decay will be more short lived and more fragmented. Improving precision will require major developments in instrumentation. The production of heavier superallowed decay nuclides will require fusion-evaporation reactions with particularly emphasis on beam purity and superior beam quality. These conditions would be met by a next-generation ISOL facility.

With the increasing diversity in experimental approaches and observables, experiments requiring significant statistics and repeated systematic (and sometimes redundant) study now suffer from lack of beam time. Moreover, the increased call for post-accelerated beams makes for a lack of time available for low-energy beams which are more favorable for the high-precision required.

International Context

Experimentally, in addition to "classical" beta-gamma spectroscopy, the concept of "total absorption spectroscopy" is especially important (conversion electrons spectroscopy can also play an important rôle). IRES, together with a group from Valencia, is currently the only collaboration performing such work and their creation - *Lucrecia*, at ISOLDE - a unique instrument.

Masses have to be measured with a Penning trap since no other technique can achieve the required accuracy. The CSNSM is an active partner in the ISOLTRAP collaboration at ISOLDE where two superallowed candidates have already been measured. Other Penning traps exist at ANL, JYFL/IGISOL, TRIUMF (soon), MAFF (soon), MSU (very soon) and are proposed for GSI.

The use of such sensitive and high-performance apparatus at newer high-intensity facilities will require concomitant development in associated beam preparation and discrimination techniques. This has been addressed in the EURISOL Design Study, recently approved by the EC.

Studying decay correlations require dedicated instruments. In particular, the measurement of the beta-neutrino angular correlation is now being prepared at GANIL using the LPCTRAP. Such measurements need especially high intensities and frequent beam time access. The rejection criteria for false kinematic events must be extensively studied to be beyond question. The same physics goals are being pursued elsewhere using atomic trapping techniques (Berkeley, Vancouver, Los Alamos, Stony Brook, and soon KVI and LNL) and also using a spectrometer based on a Penning ion trap (ISOLDE), however the LPC approach is complementary to all others.

keywords

Production:	ISOL facility (fusion-evaporation reactions); low beam energy, high beam purity and quality, frequent and extended data taking periods
Instrumentation:	Total Absorption Spectrometer; Penning trap; open-geometry traps; detection and spectroscopy; beam preparation (cooling, bunching) devices
Theory:	Increased basis and higher precision for Coulomb mixing calculations

Structure et dynamique nucléaire : Nouvelles sondes

Physique nucléaire avec des lasers ultra-intenses

Les années 1990-2000 ont vu l'émergence de lasers Ultra Haute Intensité (UHI) basés sur le principe de l'amplification à dérive de fréquence. Cette technique permet d'obtenir des impulsions lasers de durées très courtes (entre 10 fs et 300 ps) avec une énergie par impulsion comprise entre 30 mJ et 100 J et un taux de répétition allant de 10^3 Hz à 1 Hz. Ces faisceaux sont focalisés sur des surfaces de l'ordre de $30 \mu\text{m}^2$. Leurs puissances crêtes sont de l'ordre de la dizaine de terawatts (TW) et les intensités sur cible atteignent 10^{20} W/cm². Les trois caractéristiques des lasers UHI qu'il nous paraît intéressant d'explorer sont les suivantes.

1) L'interaction d'un laser avec la matière se traduit instantanément par la formation d'un plasma dense et chaud

L'onde électromagnétique et le plasma ne sont pas indépendants. L'onde laser se couple au plasma y générant ainsi des perturbations locales de la densité électronique et de la densité qui sont à l'origine de champs électriques et de champs magnétiques dans le plasma. Ces champs à leur tour sont à l'origine des différents mécanismes d'accélération des particules chargées dans l'interaction laser plasma.

Accélération des électrons par la force pondéromotrice \vec{F}_p :

Elle traduit l'interaction du champ électrique du laser avec un électron libre du plasma. C'est une force radiale qui accélère les électrons dans toutes les directions. Les électrons quittent alors le volume focal avec une énergie cinétique moyenne $E = Up$. La valeur de Up pour des électrons relativistes est donnée en fonction de l'intensité du laser par :

$$Up(\text{MeV}) = 0.511 \sqrt{(1 + 0.85 I^{18} \lambda^2) - 1}$$

où I^{18} est l'intensité laser en unité de 10^{18} W/cm² et λ sa longueur d'onde exprimée en micromètres.

Accélération des électrons par sillage :

L'onde électromagnétique induit une séparation locale des charges négatives et positives. Celle-ci, due à l'expulsion d'électrons hors de la région de focalisation sous l'effet de \vec{F}_p , est à l'origine d'une onde plasma électronique (OPE) et de la création d'un champ électrique longitudinal, \vec{E}_p , dirigé dans la direction de propagation de l'onde électromagnétique. \vec{E}_p atteint 10^{11} V/m. Cette OPE ne peut pas se développer au delà de la densité critique du plasma $N_c \sim 10^{21}$ e⁻/cm³. Certains électrons libres du plasma peuvent être piégés lors de son développement. Ils sont alors accélérés par le champ sur une longueur maximum correspondant à une demi-longueur d'onde de l'OPE. L'énergie des électrons dépend du rapport N_e/N_c qui détermine la fréquence de l'OPE. L'énergie maximale et le nombre d'électrons accélérés dépendent de la forme, de la durée et du contraste de l'impulsion laser, de la période de l'OPE et donc de la densité électronique du plasma et, des conditions d'injection dans le sillage de l'OPE.

Accélération de particules chargées lourdes H^+ , ions lourds :

Aussitôt après la mise en évidence de faisceaux d'électrons rapides, il a été montré que les lasers UHI pouvaient également être utilisés pour produire des faisceaux de H^+ et d'ions lourds sous un potentiel moyen de 10 MV. Le potentiel d'accélération est généré par les électrons rapides qui quittent la cible et qui la chargent positivement. Les faisceaux de particules obtenus ont une divergence de quelques milliradians. Leur distribution en énergie est exponentielle. Le nombre de H^+ d'énergie supérieure au MeV est de l'ordre de 10^{10} par impulsion. La variation de l'énergie des protons avec $I\lambda^2$ est linéaire, ceci permet d'envisager des potentiels d'accélération de 100

MeV/unité de charge en utilisant des lasers pétawatts .

Développements envisagés:

- Création de faisceaux d'électrons mono-énergétiques en maîtrisant les conditions d'injection des électrons dans l'OPE.
- Augmentation de l'énergie maximale en utilisant le mécanisme d'accélération par le laser d'électrons pré-accélérés par sillage.
- Augmentation du nombre d'électrons par impulsion en maîtrisant les conditions de l'amorçage de l'OPE.
- Investigation complète de l'effet de la nature des cibles sur les caractéristiques des faisceaux d'électrons et de protons.

2) Les réactions nucléaires dans un plasma ont des caractéristiques particulières

Ces caractéristiques sont liées à la présence et à l'agitation des ions et à la densité importante des électrons et des photons. Nous nous intéressons ici d'une part à la photoexcitation et à la désexcitation des isomères (applications directement liées au problème du stockage / déstockage de l'énergie et au développement du laser gamma) et d'autre part à la modification des processus nucléaires (par exemple, les taux de réactions). Nous travaillons actuellement, au laboratoire CELIA de l'université Bordeaux1, à une expérience de photoexcitation du niveau à 6 keV de durée de vie 6 μ s dans ^{181}Ta . Des expériences réalisées dans des conditions proches rapportent la production d'une centaine d'isomères par impulsion laser de 10^{16} W/cm² d'intensité.

Nous mentionnons pour mémoire les travaux sur la recherche de l'effet NEET (Nuclear Excitation by Electronic Transition) dans un plasma de ^{235}U induit par un laser de 10^{13} W/cm². Ces travaux nous ont permis de développer une méthode expérimentale et d'améliorer par deux ordres de grandeur la sensibilité de ce type de mesure par rapport aux expériences antérieures. Nous pensons possible d'installer le dispositif expérimental tel que nous l'avons développé sur des lasers plus puissants (LULI, ALIZE). L'intérêt de ces lasers par rapport au laser utilisé au CENBG serait de pouvoir atteindre les conditions de résonance entre les énergies du système électronique et les énergies du système nucléaire, aux alentours de $T = 100$ eV, dans une zone dense et sur un volume de plasma plus important.

Développements envisagés:

- Mesure de la photo excitation du ^{181}Ta au CELIA, RAL
- Mesure de l'effet NEET dans ^{235}U LULI ALIZE

Collaborations: Univ. of Glasgow, CELIA Univ. Bordeaux1, CEA DAM Bruyères-le-Chatel

3) Le champ électrique dans la zone focale de l'impulsion laser est de 10^{11} V/m.

Une approche traditionnelle consiste à dire que dans le champ du laser la fonction d'onde de l'électron libre n'est plus une onde plane mais une fonction de Volkov. De la même manière la présence d'un champ laser affecte profondément la description des états électroniques liés. Il résulte de l'interaction entre l'électron lié et le champ électromagnétique du laser un déplacement des niveaux d'énergie de l'électron appelé "effet Stark dynamique" ou encore déplacement lumineux. L'effet du déplacement des énergies des niveaux atomiques lié à la présence du champ laser a été observé expérimentalement dans des expériences de photo-ionisation des atomes par un laser. Celles-ci montrent que pour provoquer l'ionisation de l'atome il faut fournir au photo-électron une énergie égale à son énergie de liaison augmentée de l'énergie pondéromotrice correspondant au déplacement du continuum. Ces expériences ont été effectuées à des intensités laser relativement

faibles 10^{14} W/cm², qui conduisent à des potentiels pondéromoteurs de l'ordre de 10 eV. Les résultats sont en accord avec les prédictions des théories perturbatives qui sont encore applicables dans ce domaine d'intensité. Dans le cas où la valeur de U_p devient de l'ordre de grandeur du MeV on peut s'attendre à un effet du champ laser sur les décroissances radioactives nucléaires qui mettent en jeu les électrons du cortège électronique par exemple, la conversion interne (CI). Dans le cas où l'énergie U_p est supérieure à l'énergie de la transition nucléaire E_γ on peut s'attendre à une sérieuse altération du taux de CI comparé à sa valeur en l'absence du laser. Le même raisonnement s'applique à toutes les décroissances nucléaires qui mettent en jeu le cortège électronique, par exemple, la décroissance β . Que devient le taux de décroissance en présence d'un laser délivrant des intensités de l'ordre de 10^{20} W/cm² ?

Développements envisagés:

Mise au point d'une méthode expérimentale pour étudier l'influence d'un champ laser sur la CI. Les lasers utilisés pourraient être le LULI ou celui du RAL.

Collaborations: Univ. of Glasgow, univ. of Iena, LULI

Physique nucléaire avec les faisceaux de neutrinos

La disponibilité de faisceaux intenses et purs de neutrinos d'énergie incidente variable offrirait l'opportunité unique de répondre à certaines des questions ouvertes concernant les réactions neutrino-noyau ainsi que d'améliorer notre connaissance des modes d'isospin et de spin-isospin.

Modes de spin-isospin et d'isospin

Depuis très longtemps la désintégration beta des noyaux et la capture muonique sont utilisés pour étudier l'interaction faible ainsi que la structure des noyaux. C'est à l'aide de ces processus faibles que beaucoup d'informations sur les transitions vers les modes de spin-isospin et d'isospin tels que la résonance de Gamow-Teller ou bien l'état isobarique analogue ont été obtenues. Il faut noter qu'en dépit des efforts déployés, le problème du « quenching » des états des Gamow-Teller reste une question non résolue. En ce qui concerne les transitions vers les états interdits de plus haute multipolarité, à l'heure actuelle, seuls les états « spin-dipole » ont été étudiés par les réactions d'échange de charge comme (p,n) ou (n,p). Le processus de capture muonique fournit également de l'information globale sur certains de ces états. Toutefois, dans ce cas, seul un nombre restreint des états peut être peuplé car l'énergie transférée au noyau est limitée. Dans ce contexte, les neutrinos représentent une sonde très intéressante pour l'étude des modes d'isospin et de spin-isospin de plus haute multipolarité, en particulier de leur centroïde, de leur largeur ainsi que des probabilités de transition. Ces transitions pourraient également être affectées par un « quenching ». L'énergie transférée au noyau est déterminée par l'énergie incidente des neutrinos, qui peut être variée, en modifiant la source de neutrinos. L'importance relative des transitions vers les états de plus haute multipolarité change au fur et à mesure que l'énergie des neutrinos augmente (Figure 1). La disponibilité d'une source de neutrinos d'énergie variable permettrait d'étudier ces modes et leur importance relative pour des énergies croissantes des neutrinos.

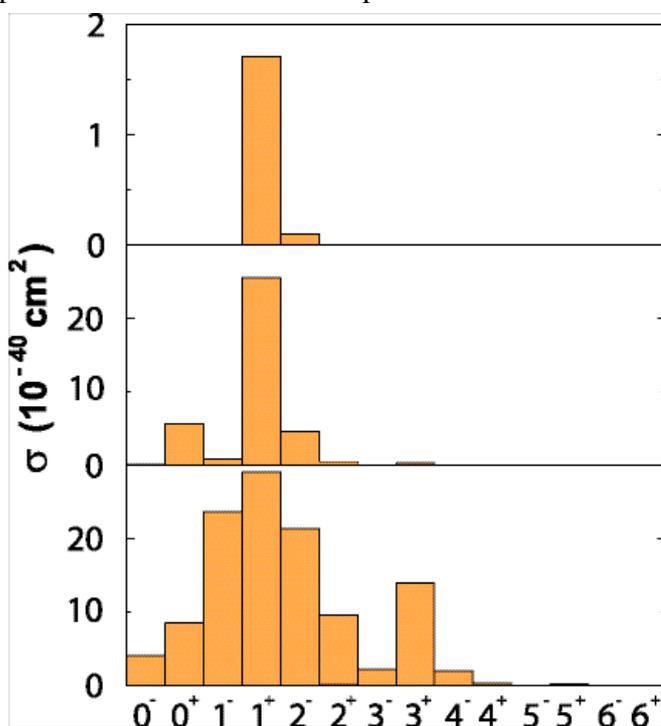
Réactions neutrino-noyau

Les réactions induites par des neutrinos sur le noyau sont à l'heure actuelle d'un grand intérêt pour divers domaines de la physique comme la physique des hautes énergies et l'astrophysique. En effet, les noyaux sont souvent utilisés pour détecter les neutrinos émis dans l'explosion d'une supernova de type II ou dans les expériences de neutrinos (e.g. d'oscillation). Ces réactions interviennent aussi dans la synthèse des éléments lourds lors du processus-r. Il existe à présent peu de données expérimentales une mesure dans le deuton, plusieurs dans le carbone et

une dans le fer. Les prédictions théoriques sont, dans ce contexte, indispensables. En particulier, on passe d'une région où les corrélations nucléaires sont importantes (pour des énergies incidentes d'une dizaine à quelques dizaines de MeV) à une région où les degrés de libertés nucléoniques sont prédominants (quand l'énergie des neutrinos devient de l'ordre des plusieurs centaines de MeV voir des GeV). Du point de vue théorique les modèles utilisés dans le premier cas sont le modèle en couches, l'approximation des Phases Aléatoires avec échange de charge (avec des particules ou des Quasi-particules), les Théories Effectives, alors qu'à très haute énergie le noyau est traité en tant que Gaz de Fermi avec des corrections, comme celles dues au Principe d'exclusion de Pauli. L'interpolation entre ces deux régions se situe entre l'ensemble des questions ouvertes, au même titre que le problème de l'extrapolation de notre connaissance de ces réactions des noyaux stables vers les noyaux loin de la vallée de stabilité qui interviennent dans les calculs de nucléosynthèse.

Projets futurs

A présent les études mentionnées ci-dessus ne peuvent être réalisées vu l'absence de faisceaux de neutrinos de basse énergie, et de faisceaux où l'énergie peut être variée facilement. En 2000, une proposition pour une installation de neutrinos de basse énergie a été faite, i.e. ORLAND, qui aurait exploité la désintégration beta des muons au repos en tant que source de neutrinos. Récemment une nouvelle méthode pour la production des neutrinos a été introduite: les beta-beams. Elle consiste à utiliser la désintégration beta des noyaux accélérés pour produire des faisceaux purs de ν_e et de anti- ν_e . L'Helium-6 et le Neon-18 sont les meilleurs candidats en tant qu'émetteurs beta-beam. L'énergie des neutrinos peut être modifiée en variant l'énergie des ions. Une installation beta-beams de basse énergie telle qu'elle a été proposée offrirait l'opportunité unique de réaliser des études systématiques des interactions neutrino-noyau ainsi que des modes d'isospin et de spin-isospin de haute multipolarité. D'autres propriétés des neutrinos comme le moment magnétique pourraient être étudiées. La production des ces faisceaux pourrait se faire dans



le cadre d'une extension du projet EURISOL et d'une installation beta-beam de haute énergie au CERN qui aurait pour but, entre autre, d'étudier la violation de CP dans le secteur des leptons. L'étude de faisabilité d'une installation beta-beam de basse énergie sera réalisée - conjointement au projet de haute énergie - au sein du « Design Study » de EURISOL.

Fig. 1: Contribution des états de différentes multipolarités à la section efficace totale de réaction $^{208}\text{Pb}(\nu_e, e^-)^{208}\text{Bi}$ pour diverses énergies incidentes des neutrinos, i.e. $E_\nu = 15 \text{ MeV}$ (haut), 30 MeV (milieu), 50 MeV (bas). Les états 0^+ et 1^+ correspondent aux transitions vers l'état isobarique analogue et la résonance de Gamow-Teller respectivement. Les états $0, 1, 2^-$ se réfèrent aux transitions vers les états « Spin-Dipole ».