

# Prospectives DSM-DAPNIA/IN2P3

## Structures et dynamique des noyaux

### Groupe n°7 : Matière, Noyaux, Transport et Transition.

(J.P. Wieleczko, A. Chbihi, O. Lopez)

#### 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 devraient 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, 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  $4\pi$  de 3<sup>ème</sup> génération indispensable apparaît être le concept FAZIA développé dans le rapport EURISOL auquel serait adjointe une détection  $4\pi$  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 soient maintenues 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 ponctuelles pourront être envisagées à GSI pour peu que les énergies des faisceaux délivrés par la machine soient adaptés à notre thématique. D'autre part, des expériences ciblées seront effectuées avec des faisceaux exotiques de SPIRAL1. Enfin, il convient de mentionner que des collaborations (NUCL-EX, ISOSPIN) 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<sup>ème</sup> 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 $\pi$  (Italie-France), le JRA EXOCHAP (France, Italie, Grèce, Roumanie), 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<sup>ème</sup> 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 $\pi$  des neutrons et des isotopes d'hydrogène de grande énergie lui sera ensuite ajoutée aux énergies EURISOL. La communauté intéressée et soutenant cette construction est constituée de 55 physiciens issus de France (Fr: 30 %), d'Italie, de Pologne et de Roumanie. La R&D pour l'électronique associée s'effectuera dans le cadre du JRA EXOCHAP.

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

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

Des études préliminaires pour établir le cahier des charges de cet appareillage ont débuté en 2001. Pour la période 2001-2003, 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 $\pi$  créé en 2000 et soutenu depuis 2002 par un PICS du CNRS. À partir de 2004 le financement de R&D s'effectue dans le cadre du 6<sup>ème</sup> PCRD européen (JRA de l'I3 EURONS). Ce financement couvrira une partie des études d'électronique et de mécanique associées à la détection.

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

Pour ce qui concerne les physiciens français, 16 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 (50 % pour la contribution française) pour la mécanique, l'électronique et l'informatique doivent, pendant la période du JRA, participer aux différents développements. Quatre techniciens équivalent plein temps (50 % pour la contribution française) 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.

## Sommaire

*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 de 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.*

## Résumé

Les objectifs du thème sont la mesure de grandeurs nucléaires fondamentales (densité de niveaux, 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). Les recherches entreprises dans ce thème dépassent le cadre nucléaire et sont au cœur des préoccupations actuelles de 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 la physique des systèmes finis. L'exploitation future de faisceaux radioactifs renforcera cette originalité.

Les multidétecteurs de grande efficacité comme INDRA sont incontournables pour cette physique. En se dotant d'un tel outil, la communauté française a contribué à enrichir la connaissance de la physique des collisions aux énergies intermédiaires, et à promouvoir de nouvelles idées sur la physique statistique des systèmes finis. Les résultats obtenus placent la communauté française à 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. Différents scénarii seront explorés pour caractériser la dynamique du processus. 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. Ces études seront complétées par la mesure des variables thermodynamiques du système (volume de freeze-out, température, potentiel chimique). Les expériences futures avec des faisceaux radioactifs permettront d'étudier l'équilibration en charge, de mesurer le terme d'asymétrie de charge de l'équation d'état, d'établir la dépendance en isospin du diagramme des phases et de la transition liquide-gaz, de rechercher le phénomène de distillation d'isospin.

La problématique requiert un système de détection à la hauteur de l'enjeu 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 SPIRAL2-LINAG et EURISOL. Le détecteur  $4\pi$  de 3<sup>ème</sup> génération indispensable apparaît être le concept FAZIA. 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 SPIRAL2-LINAG et EURISOL. 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.

## Physiciens Français impliqués dans le programme futur

### LPC Caen

- R. Bougault
- O. Lopez
- B. Tamain
- E. Vient

### GANIL

- A. Chbihi
- J. Frankland
- J.P. Wielecckzo

### IPN Orsay

- B. Borderie
- E. Galichet
- N. Le Neindre
- M.F Rivet
- P. Desesquelles

### IPN Lyon

- D. Guinet
- Ph. Lautesse

## 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.