

## Prospectives 2004-2014 DSM/DAPNIA-IN2P3

### Structure et dynamique des noyaux --- Perspectives théoriques

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 inexplicables, 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 1 et 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  $\alpha$  - 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 nucléon-nucléon 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  $\beta$  des noyaux exotiques peuvent apporter des informations sur un des éléments de la matrice CKM, ou encore la décroissance double- $\beta$  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.
- 

## Résumé

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 simplicités et les régularités observées émergent-elles dans ces mêmes systèmes complexes ? La physique nucléaire théorique a une longue tradition de développer des réponses à ces questions, avec de nombreuses contributions à l'étude des systèmes quantiques fortement corrélés. Sa tâche essentielle est d'établir, à partir de la connaissance de l'interaction forte qui existe entre mésons et nucléons isolés, les différents scénarios conduisant aux propriétés statiques et dynamiques observées dans les noyaux contenant de quelques à des centaines de nucléons, ainsi que leurs comportements au cours des collisions nucléaires.

La situation actuelle de la théorie en France se caractérise par une forte activité dans le domaine de la théorie du champ moyen et ses extensions, les calculs de modèle en couches de grandes dimensions, et les réactions nucléaires nucléon-noyau et noyau-noyau. Les méthodes développées en structure nucléaire (RPA et au-delà) ont eu dans la dernière décennie de nombreuses applications en physique des agrégats atomiques. Sur le plan international l'apport des théoriciens français est bien reconnu, et sans être exhaustif on peut dire que les groupes ayant contribué de façon significative à des thèmes tels que champ moyen, RPA ou modèle en couches sont facilement identifiables.

Dans les prochaines années, il est nécessaire d'une part de maintenir l'excellence dans les thèmes mentionnés, d'autre part de s'ouvrir à des thèmes nouveaux très importants où la présence des théoriciens français n'est pas encore assez affirmée. Parmi ces thèmes nouveaux doit figurer en bonne place l'astrophysique nucléaire, c'est-à-dire la physique nucléaire dans un environnement stellaire. C'est pourquoi deux recommandations concrètes propres à la physique nucléaire théorique se dégagent :

- 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 de l'accent très important qui sera mis en France dans le domaine de l'astrophysique nucléaire, il est nécessaire de recruter des théoriciens s'investissant dans cette physique, de fédérer et d'élargir la communauté actuellement trop peu nombreuse des théoriciens français travaillant dans ce domaine.