

Paramétrisation universelle du champ moyen nucléaire et description des états de symétries exotiques

L'étude des noyaux exotiques et des noyaux super-lourds, caractérisés respectivement par des valeurs extrêmes du paramètre $(N - Z)$, Z et N étant le nombre de protons et le nombre de neutrons, et de grandes valeurs du nombre de masse A , est à l'heure actuelle menée par un grand nombre de laboratoires dans le monde (GANIL à Caen, France, GSI à Darmstadt, Allemagne, Dubna, Russie, MSU, USA, Oak Ridge, USA, RIKEN à Tokyo, Japon...). De très nombreuses expériences ont pour buts la production de tels noyaux et la collecte de données les caractérisant. Ces noyaux sont très intéressants pour le physicien car leur stabilité fait intervenir des phénomènes nouveaux comme (entre autres) la brisure spontanée de symétrie, la chiralité nucléaire, ou encore les déformations exotiques tétraédrique et octaédrique, qui seront le principal sujet de cette thèse. Les difficultés expérimentales sont nombreuses, et sont principalement liées aux très faibles taux de production de ces noyaux.

Il existe des méthodes microscopiques auto-cohérentes telles que Hartree-Fock utilisant des interactions effectives de type Skyrme ou de portée finie, ou encore le champ moyen relativiste (RMF). Ces méthodes sont très efficaces pour les calculs microscopiques de la structure nucléaire mais présentent quelques désagréments, en particulier dans le cas d'une utilisation automatisée. Le but de notre travail consistant en une exploration à grande échelle de plusieurs propriétés nucléaires, nous avons préféré utiliser une méthode phénoménologique basée sur une paramétrisation des champs moyens nucléaires. Les modèles microscopiques basés sur l'utilisation de potentiels phénoménologiques de type Woods-Saxon relativiste, issu de l'Hamiltonien de Dirac, ou de type Woods-Saxon non-relativiste, qui ont été utilisés jusqu'à présent pour des calculs massifs, ne sont plus vraiment à jour car les données expérimentales qui ont servi à l'ajustement de leurs paramètres ont été considérablement précisées et enrichies ces dernières années. Historiquement, l'introduction de l'Hamiltonien de Dirac incluant des effets relativistes au travers du potentiel dit de « moment linéaire » V_p et de la masse effective m^* a constitué une avancée certaine par rapport aux différentes théories phénoménologiques classiques, mais faute d'une paramétrisation efficace des potentiels relativistes, son utilisation n'a pas été massivement adoptée. Les Hamiltoniens non-relativistes de type Woods-Saxon quant à eux possèdent une bonne efficacité de reproduction des données expérimentales autour des noyaux ayant servi à l'ajustement de leurs paramètres, mais n'ont pas été construits de façon à optimiser leur pouvoir d'extrapolation aux zones expérimentalement vierges ou méconnues.

Partant de ces constats, nous avons choisi de modifier certains outils théoriques parmi les plus performants sur les zones connues pour leur assurer un fort pouvoir prédictif tout en conservant leurs qualités de reproduction des données expérimentales. Cette amélioration des modèles théoriques a concerné les paramétrisations des champs moyens relativistes et non-relativistes, mais aussi la paramétrisation de la

force d'appariement nucléaire dans les formalismes d'appariement et PNP (projection du nombre de particules).

Nous avons dans un premier temps étudié précisément la méthodologie à adopter pour maximiser le pouvoir prédictif de nos modèles, comparant en particulier les avantages et les inconvénients d'une paramétrisation universelle et d'une juxtaposition de paramétrisations locales, puis nous avons procédé à l'ajustement des paramètres des potentiels nucléaires (relativistes et non-relativistes) en nous aidant d'une méthode de minimisation multi-dimensionnelle. Les résultats de cette minimisation ont permis de constater pour la première fois l'existence de plusieurs corrélations entre paramètres. En particulier, nous avons découvert une deuxième solution au problème de la paramétrisation universelle non-relativiste qui avait été ignorée jusqu'alors, ayant pour principale caractéristique un rayon du potentiel spin-orbite réduit, d'où son nom de paramétrisation compacte, par opposition à la paramétrisation dite traditionnelle, qui correspond à une paramétrisation non-compacte. Toutes ces nouvelles paramétrisations sont universelles, c'est-à-dire dépendent d'un petit nombre de constantes tout en étant utilisables pour le calcul microscopique de plus de 3000 noyaux, et nous avons montré que ceci leur garantit un pouvoir prédictif certain.

Composée du modèle LSD (Lublin Strasbourg Drop) pour le calcul de l'énergie macroscopique, des paramétrisations des champs moyens déformés relativistes et non-relativistes, du modèle du cranking pour le calcul microscopique de grandeurs relatives à des noyaux en rotation, du modèle d'appariement de type BCS ou PNP, et du modèle de Strutinsky pour le calcul des énergies de couche microscopiques, notre méthode de calcul d'énergie totale est à l'heure actuelle très performante pour le calcul d'un grand nombre de propriétés nucléaires (énergies totales de liaisons, gaps d'appariement, rayons de charge, déformations d'équilibre, barrières de fission, coexistences de formes, moments d'inertie du premier et du deuxième ordre, spectres individuels, etc...).

Les trois principaux avantages de notre approche sont :

- son temps d'exécution réduit et fixe, très bien adapté pour les calculs massifs,
- son fort pouvoir prédictif,
- le fait qu'il peut être entièrement automatisé (contrairement aux modèles auto-cohérents, qui peuvent nécessiter des interventions humaines pour répondre aux éventuels problèmes de convergence).

Ces avantages permettent des calculs systématiques à grande échelle sur des milliers de noyaux pour un très grand nombre de déformations et d'états de rotation différents. Notre méthode constitue donc un outil particulièrement adapté à l'exploration des zones méconnues de la carte des isotopes, à la recherche de phénomènes physiques inhabituels. Parmi ceux-ci, les déformations exotiques telles que les déformations tétraédrique et octaédrique ont été un des buts de nos recherches. En effet, plusieurs indices physiques tels que l'apparition de nouveaux nombres magiques pour certaines déformations de haut rang ont récemment porté

l'attention sur ces nouvelles symétries, et notre méthode est le plus à même de démontrer que certains noyaux candidats pourraient présenter un état fondamental respectant la symétrie tétraédrique ou octaédrique. Ainsi, nous avons lancé une campagne de calculs massifs afin de trouver tous les noyaux candidats à la présence de telles symétries. Les zones concernées par ces calculs s'étendent sur l'ensemble de la carte des isotopes, allant jusqu'aux noyaux super-lourds, car nous avons montré que les déformations tétraédrique et octaédrique peuvent apporter de la stabilité à certains noyaux au-delà de $Z = 110$, ce qui peut s'avérer particulièrement intéressant pour la recherche des noyaux super-lourds.

Une telle production systématique de prédictions théoriques était très attendue par la communauté scientifique, car nos calculs, outre la découverte de noyaux candidats pour les symétries exotiques, permettent la tabularisation et la confrontation à l'expérience d'un très grand nombre de données physiques. Cette base de données a été partagée avec la communauté scientifique grâce à une interface internet, permettant à des chercheurs extérieurs d'utiliser nos résultats.

En relation avec l'étude de la caractérisation d'un noyau présentant une déformation respectant une symétrie exotique, une partie de ce travail de thèse a consisté en l'étude des fluctuations thermiques de forme, avec comme principale application la prédiction microscopique de spectres de résonance géante dipolaire (GDR). En collaboration avec l'institut IFJ de Cracovie, l'application de cette approche statistique a permis la prédiction et l'interprétation de la première observation expérimentale du phénomène de "Coriolis splitting" dans les spectres de résonances géantes dipolaires. Cette étude statistique a également permis l'extension de la zone d'application de notre modèle aux noyaux possédant une température d'excitation non nulle (noyaux chauds).

En résumé, nous avons construit un des modèles les plus complets et les plus efficaces pour la description d'une grande partie des phénomènes nucléaires, dans l'optique d'une exploration automatisée des nouvelles zones d'intérêt de la physique actuelle. En particulier, cette mise au point d'outils d'une grande fiabilité et d'un fort pouvoir d'extrapolation a été la dernière étape avant le lancement de la recherche des noyaux candidats pour la présence de la déformation tétraédrique ou octaédrique.