

LE NOYAU DUR DE LA STRUCTURE NUCLÉAIRE THÉORIQUE

N. PILLET, S. PERU, S. HILAIRE, H. GOUTTE, M. GIROD, F. CHAPPERT, J.-F. BERGER
CEA – DAM – ÎLE-DE-FRANCE

L'étude de la structure des noyaux connaît un regain d'activité, notamment grâce aux nouvelles perspectives offertes par les faisceaux radioactifs SPIRAL puis SPIRAL2 du GANIL, aux études nécessaires pour les différents cycles électronucléaires, et au programme simulation du CEA-DAM. L'immense diversité des états du noyau rend sa modélisation extrêmement complexe. Actuellement, en physique nucléaire théorique, deux défis majeurs restent à relever : déduire l'interaction nucléon-nucléon effective dans les noyaux de l'interaction forte fondamentale et résoudre le problème à N-corps nucléaire. Le développement spectaculaire des supercalculateurs ces dernières années a permis la mise en œuvre de projets ambitieux qui ont conduit à des avancées significatives dans ces deux domaines.



La structure nucléaire théorique est un des pôles d'excellence du CEA-DAM. Dès les années 70, D. Gogny propose une forme analytique de l'interaction effective entre deux nucléons au sein du milieu nucléaire [1], [2]. Son principal atout : la portée finie introduite dans un de ses termes qui traduit l'interaction à distance des nucléons. Utilisée dans le contexte des théories de champ moyen, cette interaction, dont la paramétrisation est appelée D1S, rend compte de façon très satisfaisante de nombreuses propriétés des noyaux. Elle permet de décrire l'appariement des nucléons responsable de la superfluidité nucléaire, un phénomène très important dans les noyaux, ainsi que la dynamique des mouvements collectifs, en particulier le phénomène de fission. Toutefois, des améliorations doivent être apportées à cette force "historique", en particulier afin de mieux décrire les noyaux riches en neutrons dits "exotiques", et de permettre son emploi dans les nouvelles approches en cours de développement au CEA-DAM - Île-de-France.

Vers une interaction de Gogny étendue

Afin d'étendre la paramétrisation D1S, plusieurs voies ont été explorées. La première voie porte sur le réajustement des paramètres de l'interaction pour obtenir une meilleure description des masses des noyaux. Ce réajustement s'est fait en deux étapes. Dans une première étude [3], la dérive systématique des masses le long des chaînes isotopiques a été corrigée, en tenant compte de l'équation d'état de la matière neutronique. La figure 1 illustre l'amélioration obtenue avec le nouveau jeu de paramètres, appelé D1N. Dans une seconde étude plus fine [4], la déviation standard sur les masses a été ramenée

de 3 MeV à 800 keV, grâce à une procédure complexe d'ajustement intégrant notamment les données expérimentales de près de 700 noyaux.

La seconde voie d'amélioration de la force porte sur l'extension de sa forme analytique afin de permettre son utilisation dans des théories plus générales que les approches de champ moyen, théories actuellement en cours de développement. Une première étape a été franchie dans un travail de thèse où une portée non nulle a été introduite dans la composante de la force dépendant de la densité nucléaire [5]. La justification fondamentale de la forme analytique ainsi postulée a fait l'objet d'une autre thèse, au cours de laquelle des formes encore plus générales ont été proposées [6].

Vers une description unifiée du noyau

Parallèlement aux travaux sur l'interaction, l'extension de formalismes existants et le développement de nouvelles approches ont été initiés. Ainsi la méthode "RPA" (Random Phase Approximation), jusqu'ici appliquée aux seuls noyaux sphériques non superfluides, a été étendue aux noyaux déformés axialement et présentant des corrélations d'appariement. Cette approche, appelée "QRPA" (Quasiparticle RPA), permet de décrire de façon cohérente les excitations collectives et individuelles d'un grand nombre de noyaux. L'étude des isotopes du magnésium et du silicium a montré l'impact de la déformation intrinsèque des noyaux sur les résonances géantes [7]. En outre, pour une description encore plus complète des états de basse énergie du noyau, une nouvelle méthode a été proposée avec pour objectif un traitement unifié des corrélations de longue portée.

Ce "mélange de configurations multiparticules-multi-trous variationnel" permet d'éviter les approximations usuelles, comme la non-conservation du nombre de particules ou la violation du principe de *Pauli*. Une étude sur les propriétés des états fondamentaux des isotopes de l'étain a notamment montré l'importance de la conservation du nombre de particules dans la description de la superfluidité nucléaire [8].

Conclusion

L'année 2008 a été marquée par plusieurs travaux importants en physique nucléaire théorique, d'une part sur l'interaction effective, d'autre part sur la résolution du problème à N-corps. Ces travaux sont en train d'aboutir à une approche très ambitieuse de la structure nucléaire qui devrait permettre, dans un proche avenir, de décrire avec une précision accrue l'ensemble des noyaux envisageables ainsi que les phénomènes complexes comme la fission.

Références

- [1] J. DECHARGÉ, D. GOGNY, "Hartree-Fock-Bogoliubov calculations with the D1 effective interaction on spherical nuclei", *Phys. Rev. C*, **21**, p. 1568-1593 (1980).
- [2] J.-F. BERGER, M. GIROD, D. GOGNY, "Time-dependent quantum collective dynamics applied to nuclear fission", *Comp. Phys. Comm.*, **63**, p. 365-374 (1991).
- [3] F. CHAPPERT, M. GIROD, S. HILAIRE, "Towards a new Gogny force parametrization : impact of the neutron matter equation of state", *Phys. Lett. B*, **668**, p. 420-424 (2008).
- [4] S. GORIELY, S. HILAIRE, M. GIROD, S. PERU, soumis à *Physical Review Letters*.
- [5] F. CHAPPERT, "Nouvelles paramétrisations de l'interaction nucléaire effective de Gogny", Thèse de doctorat – Université Paris Sud – XI (2007).
- [6] V. ROTIVAL, "Fonctionnelles d'énergie non empiriques pour la structure nucléaire", Thèse de doctorat – Université Denis Diderot, Paris VII (2008).
- [7] S. PÉRU, H. GOUTTE, "Role of deformation on giant resonances within the quasiparticle random-phase approximation and the Gogny force", *Phys. Rev. C*, **77**, p. 044313 (2008).
- [8] N. PILLET, J.-F. BERGER, E. CAURIER, "Variational multiparticle-multihole configuration mixing method applied to pairing correlations in nuclei", *Phys. Rev. C*, **78**, p. 024305 (2008).

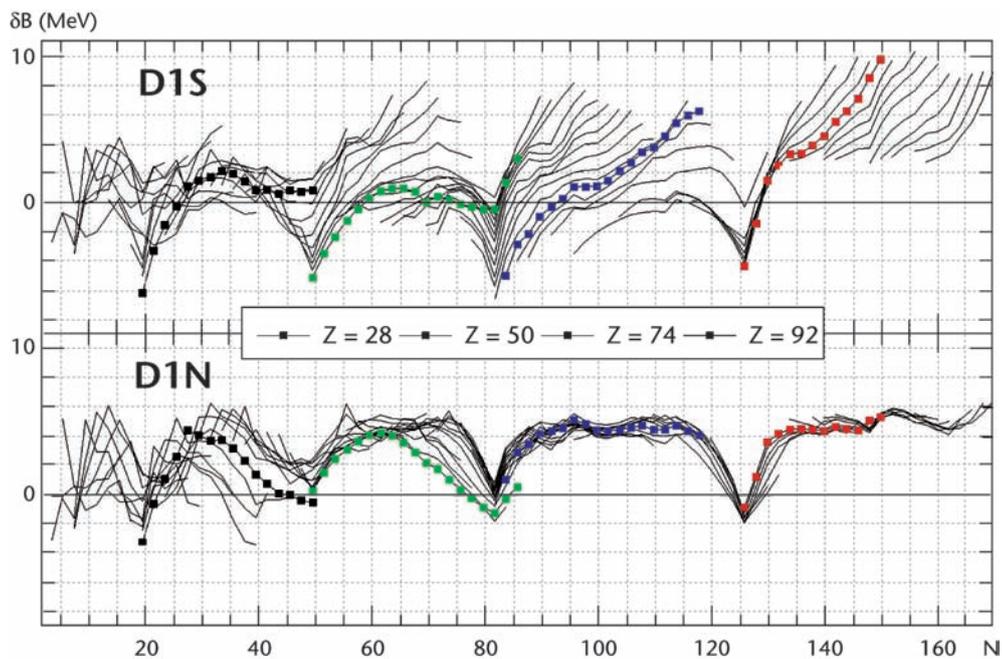


Figure 1 Différences δB entre masses théoriques et expérimentales calculées avec D1S et D1N en fonction du nombre de neutrons le long des chaînes isotopiques (à différents Z).