

N = 28 : une fermeture de couche en pleine forme

Les développements technologiques de ces dernières années ont permis de produire des noyaux de plus en plus « exotiques ». Ainsi les noyaux radioactifs présentant 28 neutrons ont pu être produits à des taux permettant leur étude. La dizaine d'années d'efforts expérimentaux et théoriques est aujourd'hui récompensée par une compréhension globale de la structure nucléaire autour du nombre magique $N = 28$. Cet article en présente les grandes lignes.

L. Gaudefroy CEA - DAM Île-de-France

Contexte de l'étude

L'étude de l'évolution de la structure nucléaire de la vallée de stabilité vers les noyaux radioactifs est un axe de recherche important. Bâti sur la connaissance des propriétés des noyaux stables, les modèles nucléaires ont pour socle les nombres dits « magiques ». Comme en physique atomique, ces nombres résultent d'un écart en énergie important, appelé « gap », entre les orbitales sur lesquelles s'agencent les nucléons. On comprend alors qu'un noyau possédant un nombre magique (2, 8, 20, 28, 50, etc.) de protons et/ou de neutrons présente un surcroît de stabilité par rapport à ses voisins. Cependant, à la fin des années 70, l'expérience a montré que les nombres magiques sont susceptibles d'être modifiés lorsque l'on s'éloigne de la vallée de stabilité.

Les conséquences ne sont pas uniquement fondamentales. L'évolution des nombres magiques peut par exemple modifier les sections efficaces de réaction de plusieurs ordres de grandeur.

À défaut de pouvoir étudier les milliers de noyaux liés, il semble nécessaire d'être en mesure de les décrire théoriquement. La difficulté est alors de décrire la structure d'un système à N -corps alors même que l'on ne sait pas précisément comment interagissent ses constituants. L'approche utilisée en physique nucléaire consiste à ramener le problème à N -corps à un problème à deux corps interagissant par le biais d'une interaction effective. La validation de ces théories passe par la comparaison aux données expérimentales.

Résultats expérimentaux

Les expériences menées ces dernières années sur la structure des noyaux ayant 28 neutrons et

leurs voisins, ont permis de dresser un tableau global et cohérent de l'évolution de la structure dans cette région de masse brièvement dépeint dans la suite.

Le dernier isotope stable du calcium, le ^{48}Ca , comporte 20 protons et 28 neutrons. Il est doublement magique et donc très difficile à exciter, son premier état se trouvant à environ 4 MeV. Comme pour tous les noyaux magiques, la forme d'équilibre du ^{48}Ca est sphérique.

En retirant 2 protons au ^{48}Ca , nous aboutissons à l'isotope radioactif de l'argon comportant 46 nucléons : 18 protons et 28 neutrons. Les études sur ce noyau ont montré qu'il est beaucoup plus facile à exciter que son voisin, le ^{48}Ca . Son premier état excité est abaissé de près de 2,5 MeV par rapport au ^{48}Ca , et se trouve à environ 1,6 MeV [1]. Il a été montré expérimentalement, à Caen auprès des installations du GANIL, que la taille du gap $N = 28$ est modestement réduite d'environ 330 keV entre les noyaux de ^{48}Ca et ^{46}Ar [2]. Les modèles théoriques reproduisent ces données et montrent que la forme d'équilibre du ^{46}Ar reste plutôt sphérique [3,4].

En s'éloignant encore de la vallée de stabilité, nous arrivons sur les isotopes du soufre présentant 16 protons. Des expériences ont été réalisées, au GANIL, sur les isotopes de ^{43}S et ^{44}S ayant respectivement 27 et 28 neutrons [5]. Les résultats de ces expériences montrent que ces noyaux radioactifs sont loin d'avoir les propriétés attendues pour des noyaux magiques, ou proches d'un nombre magique. En particulier, ils sont le siège du phénomène de coexistence de forme : à basse énergie d'excitation, deux états coexistent dont l'un a la forme sphérique attendue, et l'autre a une forme très

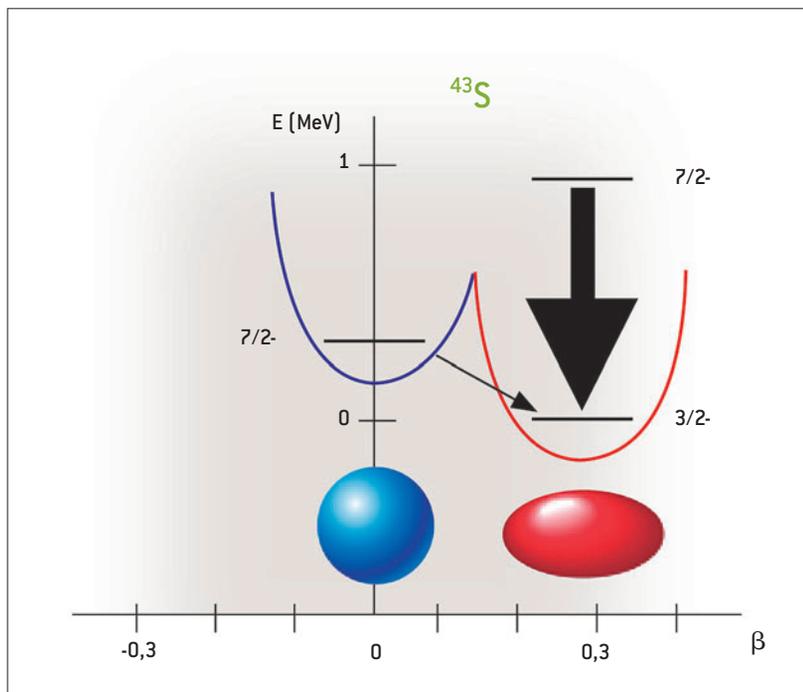


Figure 1.
Coexistence de forme dans le ^{43}S : l'état déformé (**ellipsoïde rouge**) est énergétiquement favorisé par rapport à la configuration sphérique (**sphère bleue**) du noyau comme démontré expérimentalement dans la référence [5].
[illustration : Allan Stonebraker [7]]

allongée du type ballon de rugby (**figure 1**). Indubitablement, $N = 28$ n'a plus rien d'un nombre magique loin de la vallée de stabilité. Ces résultats sont en parfait accord avec les modèles théoriques actuels [3,4].

Finalement, l'isotope 42 du silicium (14 protons et 28 neutrons) a aussi pu être étudié au GANIL. Ce noyau n'étant produit qu'à un taux d'une dizaine d'ions par jour, son étude est une prouesse expérimentale. Elle nous a appris que le premier état excité de ce noyau se trouve à 770 keV, l'une des plus basses énergies d'excitation connues pour un noyau dans cette région de masse [6]. Nous sommes maintenant bien loin des 4 MeV évoqués ci-dessus pour le ^{48}Ca et donc du caractère magique de $N = 28$. L'interprétation théorique de ce résultat montre que le ^{42}Si est un noyau très déformé, ayant une forme rarement observée en physique nucléaire, celle d'un disque [3, 4].

Conclusion

L'aboutissement de plusieurs années de recherche sur la structure des noyaux $N = 28$ révèle une richesse de formes nucléaires, depuis le noyau magique et sphérique de ^{48}Ca , jusqu'au noyau disque très aplati qu'est le ^{42}Si , en passant par les noyaux intermédiaires de $^{43,44}\text{S}$ hésitant entre les formes sphériques et déformées. Ces études ont

permis de valider et d'améliorer les modèles théoriques, donnant lieu aujourd'hui à une compréhension globale et cohérente de la structure nucléaire dans cette région de masse.

L'arrivée prochaine de nouvelles générations d'accélérateurs, tel que SPIRAL2 au GANIL, permettra de transposer ces études à des noyaux pour l'instant inaccessibles.

RÉFÉRENCES

- [1] H. SCHEIT *et al.*, "New region of deformation: the neutron-rich sulfur isotopes", *Phys. Rev. Lett.*, **77**, p. 3967-3970 (1996).
- [2] L. GAUDEFROY *et al.*, "Reduction of the spin-orbit splittings at the $N=28$ shell closure", *Phys. Rev. Lett.*, **97**, 092501 (2006).
- [3] F. NOWACKI *et al.*, "New effective interaction for $0h\omega$ shell model calculations in the sd-pf valence space", *Phys. Rev. C*, **79**, 014310 (2009).
- [4] S. PÉRU *et al.*, "Evolution of the $N=20$ and $N=28$ shell closures in neutron-rich nuclei", *Eur. Phys. J. A*, **9**, p. 35-47 (2000).
- [5] L. GAUDEFROY *et al.*, "Shell erosion and shape coexistence in ^{43}S ", *Phys. Rev. Lett.*, **102**, 092501 (2009).
- [6] B. BASTIN *et al.*, "Collapse of the $N=28$ shell closure in ^{42}Si ", *Phys. Rev. Lett.*, **99**, 022503 (2007).
- [7] P. MANTICA, "Peaceful coexistence of nuclear shapes", *Physics 2*, 18 (2009).