

Les visages du noyau

E. Khan

► **To cite this version:**

| E. Khan. Les visages du noyau. Plein Sud, 2004, 58, pp.26-27. in2p3-00023495

HAL Id: in2p3-00023495

<http://hal.in2p3.fr/in2p3-00023495>

Submitted on 21 Dec 2004

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Les visages du noyau

Quel est le point commun entre des atomes refroidis à des températures proches du zéro absolu, et des particules cosmiques aussi énergétiques qu'une balle de tennis lancée à 50 km/h ? Entre la surface des étoiles à neutrons, et l'exotisme des noyaux ? A l'Institut de Physique Nucléaire (IPN), pièce 137, certains aspects de tous ces phénomènes qui touchent de près au noyau atomique sont étudiés attentivement.

Le noyau atomique intéresse différents domaines de la physique : par son rôle direct dans les processus physiques, tels que la nucléosynthèse ou les rayons cosmiques d'ultra-haute énergie ; par la possibilité de s'exporter en tant que modèle ou analogie (on parle de système de fermions à « N-corps ») : atomes ultra-froids, étoiles à neutrons ... L'étude de l'édifice nucléaire sous toutes ses coutures, en plus de l'apport à la compréhension de la structure nucléaire, se révèle donc très utile et novatrice pour d'autres domaines. Le noyau conserve ainsi une extraordinaire capacité à contribuer à de nombreux thèmes de physique émergents.

Des atomes à ultra-basse température...

Depuis une dizaine d'années une grande effervescence agite le monde de la physique atomique : pour la première fois en 1995 le fameux condensat de Bose-Einstein, prédit depuis 1924, a été directement observé. Pour y parvenir, des atomes dits « bosoniques » sont refroidis à des températures très proches du zéro absolu (quelques milliardièmes de degrés Kelvin), par piègeage magnétique. Tous ces atomes se trouvent alors dans le même état quantique : c'est la condensation de Bose-Einstein.

Est-il possible de former un condensat de fermions ? La mécanique quantique interdit justement aux atomes fermioniques d'occuper le même état, ce qui rend impossible la formation directe d'un condensat. Cependant, en les refroidissant, ces atomes vont se regrouper par paire : c'est le phénomène de superfluidité. Une fois une paire de fermion formée, elle constitue un boson. En refroidissant encore le système de fermions superfluide, un condensat de Bose pouvait voir le jour. Ce fut chose faite en avril 2004 par une équipe du laboratoire JILA (USA), qui a refroidi un gaz d'atomes de potassium 40 et observé une condensation de Bose-Einstein.

Comment décrire théoriquement ce piège d'atomes fermioniques ? Le noyau étant un système de fermions superfluide, l'introduction des concepts et techniques de la physique nucléaire est donc naturelle. Ainsi les techniques de problèmes dits « à N-corps » permettent de prédire la température critique en-dessous de laquelle le gaz d'atomes fermionique devient superfluide. Les réponses du piège d'atomes à une excitation externe sont également modélisées. Dans ce domaine, les calculs entièrement microscopiques utilisant la mécanique quantique ont été importés par des théoriciens en physique nucléaire, comme à l'IPN. L'utilisation de ces modèles (comme ceux au-delà des équations dites de « Bogoliubov- de Gennes ») donne une vision microscopique de ces pièges, de manière à être le plus prédictif possible : comment déceler la transition vers la phase superfluide ? La figure 1 montre la réponse du gaz d'atomes en fonction de l'énergie d'une excitation externe : les deux pics observés sont caractéristiques d'une phase superfluide.

...aux rayons cosmiques à Ultra-Haute Energie

Les noyaux atomiques se cachent parfois là où on ne les attend pas. Depuis les années 1930, on sait que des rayons cosmiques bombardent l'atmosphère terrestre. Parmi eux, il y a de mystérieuses particules de très haute énergie, typiquement de l'ordre de quelques Joules (l'énergie d'une balle de tennis). Leur nature et leur origine restent inconnues, et plusieurs

hypothèses sont avancées, les noyaux figurant parmi les candidats. Pour valider ou invalider la nature nucléaire de ces rayons, il est nécessaire de prédire la propagation de ces noyaux d'ultra-haute énergie à travers l'espace : la comparaison avec les spectres atmosphériques incidents mesurés par l'observatoire Pierre Auger fournira une précieuse réponse.

Au cours de leurs propagation intergalactique, les noyaux interagissent avec les photons du fameux rayonnement cosmologique à $3 \text{ }^\circ \text{ K}$. Vus du noyau, ces photons acquièrent une énergie typique du domaine nucléaire. Ainsi les noyaux perdent sporadiquement leurs nucléons (les neutrons et les protons qui les composent) au cours de leur propagation, en interagissant avec ces photons. Ils arriveront finalement sur l'atmosphère terrestre complètement épluchés de leurs nucléons. Dans ce cas, il est nécessaire de prédire le plus précisément possible leur manière de se photo-désintégrer, donc les probabilités d'interaction de la centaine de noyaux impliqués avec les photons du rayonnement cosmique. Cette grandeur n'a été mesurée que pour une minorité de noyaux, et il est donc nécessaire de les prédire de la manière la plus fiable possible, tout en vérifiant la bonne reproduction des données existantes. Des modèles de désexcitation nucléaire parmi les plus récents sont donc utilisés à l'IPN. La figure 2 montre l'ensemble des noyaux produits par la désintégration d'un noyau de Fer lors de sa propagation intergalactique sur une distance typique de 30 millions d'années lumières.

Etoiles à neutrons

Les étoiles à neutrons (figure 3) sont des cadavres d'étoiles, résidus des explosions les plus violentes de l'univers : les supernovae. Les étoiles à neutrons ont été prédites dès les années 30 et observées au cours des années 60. Loin d'être uniformes, ces étoiles ont une structure complexe, constituée de couches en pelures d'oignons. En particulier, leur croûte recèle un curieux mélange de neutrons et de protons : ces derniers baignent dans une mer de neutrons. L'effet de la superfluidité dans ces croûtes peut être prédit par des modèles nucléaires, en juxtaposant des « super-noyaux » composés de plusieurs milliers de nucléons. Leurs propriétés sont surprenantes par rapport à celles des noyaux conventionnels. Ainsi il est possible de prédire la réponse d'un « super-noyau » de la croûte d'une étoile à neutrons à une excitation externe, provoquée par exemple par des champs magnétiques très intenses régnants au sein de l'étoile.

Quel Exotisme !

Ces exemples montrent que la compréhension de l'édifice nucléaire dépasse largement le cadre de la structure du noyau au sens strict. Ces exportations de concepts ne sont possibles que grâce à une étude ambitieuse de la structure nucléaire pour elle-même. Ainsi, des expériences sont menées pour comprendre la structure nucléaire, à l'aide de noyaux très instables, comportant souvent un très fort excédent de neutrons par rapport au nombre de protons. Ces noyaux instables représentent 95 % des noyaux pouvant exister dans la nature. Ils sont cependant en majorité absents de la Terre, à cause de leur caractère instable. Mais environ la moitié d'entre eux nous sont accessibles depuis les années 90, grâce à des usines de production de noyaux exotiques, comme au GANIL (Caen), au NSCL (Lansing, Michigan) ou au Riken Institute (Tokyo). L'étude de leur structure s'effectue alors dans la foulée de leur production, apportant ainsi une moisson de résultats : seule la partie visible de l'iceberg (les noyaux stables) a servi à modéliser l'édifice nucléaire durant un siècle. Une nouvelle ère s'ouvre, où ces modélisations s'élargissent grâce aux noyaux exotiques pour comprendre la structure nucléaire dans toutes sa généralité. Ainsi des usines de noyaux exotiques de « nouvelle génération » verront le jour d'ici 2015, pour produire des faisceaux de noyaux très instables, d'une intensité mille fois supérieure aux faisceaux actuels. La figure 4 montre le projet EURISOL, pour la production de noyaux exotiques en Europe. Des projets similaires sont également en cours d'évaluation aux échelles américaine et japonaise.

L'expérience et la théorie s'allient pour comprendre les phénomènes au coeur des noyaux exotiques. Par exemple, il semble que la magie des noyaux soit remise en question. Les nombres magiques donnent aux noyaux qui possèdent les nombres correspondants de neutrons ou de protons une sur-stabilité. Ces nombres magiques semblent évoluer ou disparaître pour les noyaux exotiques. Ainsi, plusieurs études expérimentales et théoriques menées à l'IPN sur l'isotope instable ^{22}O , montrent que ce noyau présente une sur-stabilité comparé à ses isotopes voisins, alors que ce noyau n'était pas prédit comme magique. De nouveaux modèles théoriques voient également le jour comme la dynamique moléculaire, où les nucléons dans le noyau se regroupent sous forme d'agrégats distincts interagissant entre eux, à l'instar des atomes au sein d'une molécule. Cette vision du noyau a été confirmée, par exemple par l'étude expérimentale du noyau exotique ^{12}Be . La physique nucléaire continue à nourrir de ses avancées les nombreux thèmes où elle s'applique, soit en tant que noyau acteur, soit en tant que noyau modèle. Le formidable essor dû à la production des noyaux exotiques permet de généraliser notre compréhension de cet édifice si mystérieux et ainsi nourrir un dialogue entre la structure nucléaire et ses domaines connexes. A quand une dynamique moléculaire dans les croûtes d'étoiles à neutrons ?

Elias Khan