

■ LES AUTEURS



Jean-Paul EBRAN est chercheur au CEA à Arpajon.

Elias KHAN est professeur à l'Université Paris-Sud et à l'Institut de physique nucléaire d'Orsay. Il est membre de l'Institut universitaire de France.

■ BIBLIOGRAPHIE

J.-P. Ebran *et al.*, Density functional theory studies of cluster states in nuclei, *Physical Review C*, vol. 90, 054329, 2014.

G Burgunder *et al.*, Experimental study of the two-body spin-orbit force in nuclei, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 112, 042502, 2014.

L. P. Gaffney *et al.*, Studies of pear-shaped nuclei using accelerated radioactive beams, *Nature*, vol. 497, pp. 199-204, 2013.

J.-P. Ebran *et al.*, How atomic nuclei cluster, *Nature*, vol. 487, pp. 341-344, 2012.

J. Erler *et al.*, The limits of the nuclear landscape, *Nature*, vol. 486, pp. 509-512, 2012.

J. Novak, Les étoiles à neutrons, *Dossier Pour la Science*, n° 75, avril-juin 2012.

ont ainsi ordonné les éléments dans un tableau en fonction de propriétés qui dépendent du nombre d'électrons sur les couches externes de l'atome. Par ailleurs, les centaines de particules découvertes dans les collisionneurs, répondant au nom de hadrons, ont pu être classées lorsqu'on a compris qu'elles étaient un assemblage de particules élémentaires, les quarks.

Pour comprendre la variété des structures du noyau, nous avons donc recherché des règles sous-jacentes et développé une approche théorique qui rend compte des différentes phases du noyau. Similaires aux phases solide, liquide et gazeuse de la matière ordinaire, ces phases dépendent des propriétés de ses composants, les protons et les neutrons. Il est donc essentiel de comprendre la structure du noyau avant d'en étudier les différentes phases.

Au cœur du noyau

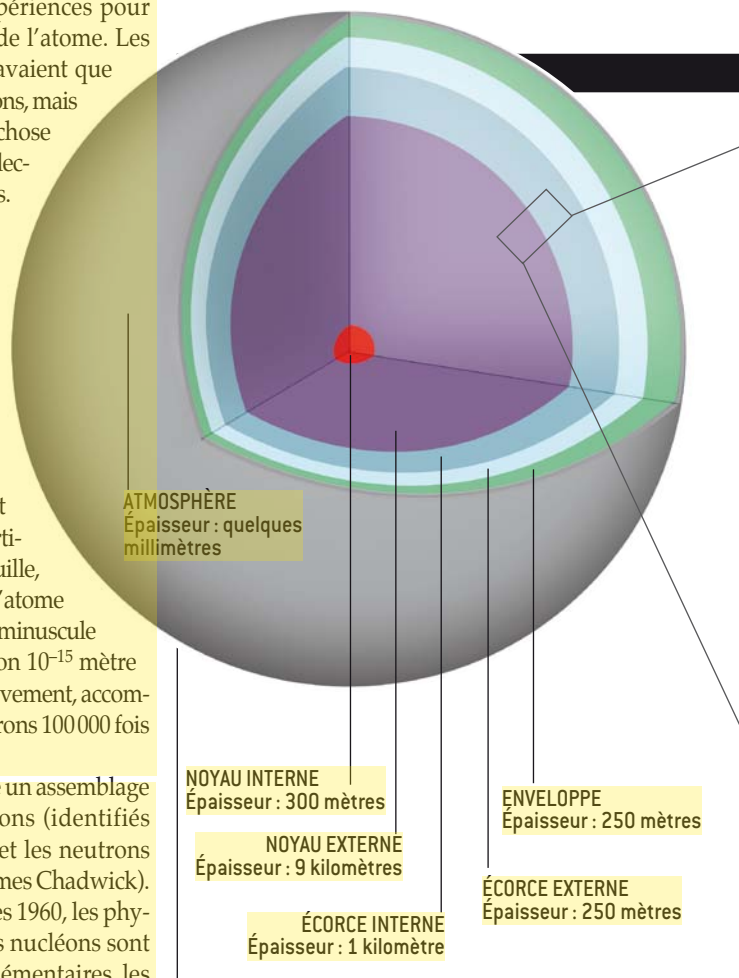
La vision que l'on a du noyau atomique n'a cessé d'évoluer depuis sa mise en évidence en 1911 par Rutherford. Ce physicien menait alors des expériences pour comprendre la structure de l'atome. Les chercheurs de l'époque savaient que l'atome contenait des électrons, mais il devait renfermer autre chose pour compenser la charge électrique négative des électrons. On pensait l'atome comme un objet de 10^{-10} mètre de diamètre dans lequel les électrons étaient incrustés, à l'image d'un gâteau contenant des raisins secs. En bombardant une feuille d'or avec des particules α (des noyaux d'hélium) et en mesurant l'angle de déviation des particules rebondissant sur la feuille, Rutherford a compris que l'atome est en réalité constitué d'un minuscule noyau très dense, d'environ 10^{-15} mètre de diamètre et chargé positivement, accompagné d'un cortège d'électrons 100 000 fois plus étendu que lui.

Le noyau est lui-même un assemblage de « nucléons » : les protons (identifiés par Rutherford en 1917) et les neutrons (découverts en 1932 par James Chadwick). Par la suite, dans les années 1960, les physiciens ont montré que les nucléons sont constitués de particules élémentaires, les

quarks et les gluons. Pour l'essentiel, le proton est composé de deux quarks u et un quark d , tandis que le neutron est l'assemblage de deux quarks d et un quark u . La cohésion entre les quarks est assurée par l'interaction forte, véhiculée par des gluons, dont le nom indique leur fonction de colle entre les quarks.

C'est également l'interaction forte qui colle les nucléons et maintient la cohésion du noyau. En réalité, la description du nucléon fournie par la chromodynamique quantique – la théorie qui décrit l'interaction forte – est celle d'une « soupe » d'une multitude de quarks et gluons en interaction. Du fait de cette complexité, l'interaction forte entre nucléons n'est que partiellement comprise.

Pour compléter ce tableau, il faut ajouter que les protons sont chargés positivement ; par conséquent, la force électromagnétique a une influence dans le noyau. Enfin, les nucléons sont sensibles à l'interaction faible, qui se manifeste par la radioactivité bêta, où, par exemple, la transformation d'un neutron en un proton s'accompagne de



l'émission d'un électron et d'une autre particule au caractère éluif, le neutrino.

Ainsi, pour étudier le noyau, il faut prendre en compte trois des quatre forces fondamentales (les interactions forte, faible et électromagnétique) et tous ses nucléons. C'est un grand défi d'ordre mathématique. Pourquoi ? Il est assez aisé d'obtenir une description précise d'un système de deux particules en interaction. Il est aussi possible d'étudier statistiquement un système formé d'un très grand nombre d'éléments, un gaz par exemple, et de calculer ses grandeurs thermodynamiques (pression, température, etc.).

Cependant, entre ces deux régimes, pour un noyau formé d'une dizaine ou quelques centaines de nucléons, on ne sait décrire le système ni de façon exacte ni de façon statistique. Par exemple, l'ajout d'un seul nucléon à un noyau en bouleverse les propriétés !

Si la complexité du noyau atomique rend son étude très ardue, elle est aussi la source d'une grande diversité de phénomènes touchant la structure du noyau

et sa dynamique. Comment intégrer cette variété dans une description fondamentale et unifiée du noyau atomique ?

Une approche fructueuse est de considérer que le noyau peut présenter différentes phases qui découlent de la compétition entre la nature quantique des nucléons et leurs interactions. D'après le principe de dualité onde-corpuscule, les nucléons présentent à la fois des propriétés d'onde

Pour classer les diverses formes de noyaux, il faut considérer la nature quantique des nucléons.

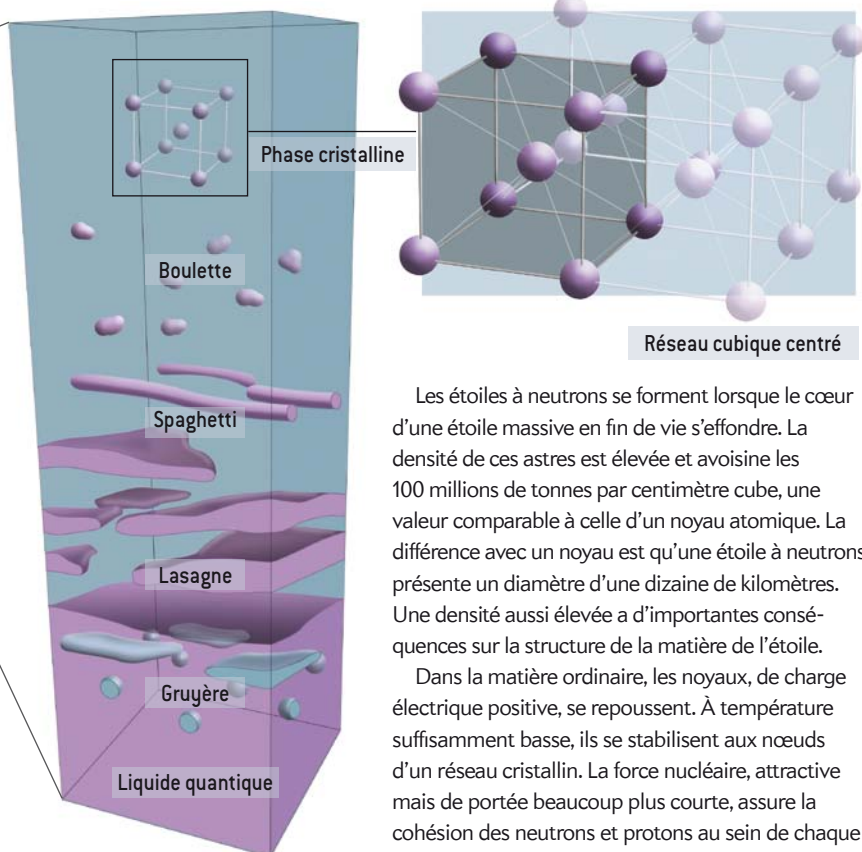
et de particule. Mathématiquement, ils sont décrits par une fonction d'onde qui détermine leur probabilité de présence : selon que cette fonction est concentrée dans l'espace ou étendue, chaque nucléon est plus ou moins bien localisé dans le noyau. Les interactions des nucléons influent directement sur leur localisation.

Plus l'interaction d'un nucléon avec ses congénères domine l'agitation des protons et des neutrons, plus la position du nucléon sera bien déterminée.

Dans une étude récente, nous avons considéré deux grandeurs caractéristiques du noyau : la dispersion spatiale des fonctions d'onde des nucléons et la distance moyenne entre ces particules. Le rapport de ces deux caractéristiques – le « paramètre de phase » – nous a permis de définir trois phases dans le noyau : liquide, moléculaire et cristalline. Les nucléons y sont plus ou moins localisés, ce qui influe sur la structure, les propriétés et la forme du noyau.

Ces phases étaient déjà connues, mais leur description faisait appel à des modèles qui coexistaient, sans que l'on puisse les relier. Il est maintenant possible d'appréhender la diversité des phénomènes observés dans les expériences nucléaires par une approche unique et en partie fixée par le paramètre de phase (voir la figure page 34).

DE LA MATIÈRE NUCLÉAIRE EXOTIQUE DANS LES ÉTOILES À NEUTRONS



Les étoiles à neutrons se forment lorsque le cœur d'une étoile massive en fin de vie s'effondre. La densité de ces astres est élevée et avoisine les 100 millions de tonnes par centimètre cube, une valeur comparable à celle d'un noyau atomique. La différence avec un noyau est qu'une étoile à neutrons présente un diamètre d'une dizaine de kilomètres. Une densité aussi élevée a d'importantes conséquences sur la structure de la matière de l'étoile.

Dans la matière ordinaire, les noyaux, de charge électrique positive, se repoussent. À température suffisamment basse, ils se stabilisent aux nœuds d'un réseau cristallin. La force nucléaire, attractive mais de portée beaucoup plus courte, assure la cohésion des neutrons et protons au sein de chaque

noyau. Dans une étoile à neutrons, la gravité domine la répulsion électromagnétique et impose une courte distance entre les noyaux.

L'enveloppe de l'étoile est constituée d'un réseau cristallin de noyaux de fer baignant dans un gaz d'électrons. Dans l'écorce externe, la densité est plus forte, de sorte que des protons interagissent avec les électrons et forment des neutrons. Le réseau cristallin est alors constitué de différents noyaux de numéro atomique proche de celui du fer. Comme les noyaux sont alors très riches en neutrons, ces derniers commencent à s'échapper des noyaux pour former un gaz de neutrons.

Dans la partie interne de l'écorce des étoiles à neutrons, la densité atteint celle des noyaux atomiques. L'équilibre entre la force attractive nucléaire, la répulsion électrique et la gravité devient complexe et donne naissance à des états exotiques de la matière en forme de « boulettes », de « spaghettis », de « lasagnes » et de « gruyère » de plus en plus riches en neutrons et denses. Ces états sont bien décrits par les modèles moléculaires nucléaires. Cette transition conduit à une phase homogène dans la partie interne de l'écorce, de type liquide nucléaire, mais à une échelle macroscopique. La composition exacte du cœur varie selon les modèles utilisés pour décrire les étoiles à neutrons.