

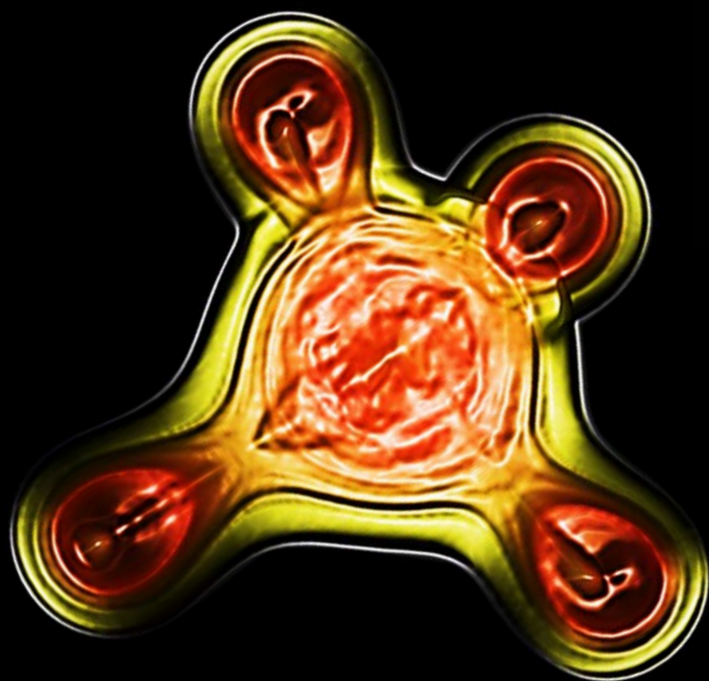
Carbone 12



## L'ESSENTIEL

- Le noyau atomique présente une grande diversité de formes et de structures.
- La compétition entre le caractère quantique des éléments du noyau et leurs interactions permet de définir trois phases : le « liquide quantique », le « noyau moléculaire » et une phase cristalline.
- Certains noyaux sont constitués en agrégats, tels les atomes dans une molécule. Cet état « moléculaire » a été essentiel dans la formation des éléments tel le carbone.
- La phase cristalline est présente dans les étoiles à neutrons.

Soufre 32



Néon 20

**AU SEIN DE CERTAINS NOYAUX ATOMIQUES,** les nucléons (protons ou neutrons) forment des sous-ensembles denses (*en rouge*) liés par l'interaction forte. On parle de « noyaux moléculaires », car ils rappellent les molécules, dont les atomes forment des liaisons électroniques. Ces images sont le résultat de simulations numériques.

## 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  $\alpha$  (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

