

cérébrale particulière pourrait traduire une meilleure conscience de l'environnement et des processus mentaux intérieurs, bien que des recherches complémentaires soient nécessaires pour mieux comprendre le fonctionnement des oscillations gamma.

Des aires cérébrales qui changent de volume

La méditation modifie également le volume de certaines aires cérébrales, sans doute en raison de changements du nombre de connexions entre cellules nerveuses. Une étude préliminaire menée par Sara Lazar, de l'Université Harvard aux États-Unis, et ses collègues a révélé des différences entre l'insula et le cortex préfrontal de méditants expérimentés et de sujets d'un groupe témoin. Plus précisément, le volume de matière grise (constituée essentiellement des corps cellulaires de neurones) n'était pas le même dans les régions nommées aires de Brodmann 9 et 10, souvent activées pendant la méditation. Ces différences étaient supérieures chez les participants les plus âgés, suggérant que la méditation influe sur l'amincissement cortical provoqué par le vieillissement.

S. Lazar et ses collègues ont aussi découvert un effet de la méditation de pleine conscience sur l'amygdale, une aire cérébrale intervenant dans le traitement de la peur. Ils ont entraîné à cette forme de méditation des sujets dont ils mesuraient par ailleurs la sensibilité au stress. Pour ceux chez qui cette sensibilité diminuait le plus, les chercheurs ont constaté un rétrécissement de l'amygdale.

Dans une autre étude, Eileen Luders, de l'Université de Californie à Los Angeles, et ses collègues ont observé chez les méditants certaines spécificités des axones (des prolongements neuronaux pouvant relier différentes régions cérébrales), qui suggéraient une multiplication des connexions cérébrales. Tous ces résultats semblent accréditer l'idée que la méditation entraîne des modifications structurales dans le cerveau. Cependant, on manque d'études de longue durée, où un groupe est suivi sur plusieurs années, ainsi que de comparaisons systématiques entre des méditants et des personnes de milieux et d'âges similaires qui ne méditent pas.

Quelques études suggèrent que la méditation ne modifie pas que le cerveau, mais aussi le reste du corps. Elle pourrait ainsi atténuer les inflammations et d'autres stress moléculaires. Une équipe dirigée par Perla

■ LES AUTEURS



Matthieu RICARD est docteur en génétique cellulaire et moine bouddhiste tibétain.



Antoine LUTZ est chercheur à l'Université du Wisconsin à Madison, aux États-Unis, et chargé de recherche de l'Inserm au Centre de recherche en neurosciences de Lyon.



Richard DAVIDSON dirige le Laboratoire Waisman d'imagerie cérébrale et du comportement, à l'Université du Wisconsin à Madison.

Kaliman, de l'Institut de recherche biomédicale de Barcelone, a montré tout récemment que chez des pratiquants expérimentés, une journée intensive de méditation de pleine conscience influe sur les enzymes régulant la lecture du génome et diminue l'expression de gènes responsables des inflammations.

Cliff Saron, de l'Université de Californie à Davis, a étudié l'effet de la méditation sur la longévité des cellules. Il s'est intéressé à une enzyme nommée télomérase, qui rallonge des segments d'ADN à l'extrémité des chromosomes. Ces segments, les télomères, assurent la stabilité du matériel génétique pendant la division cellulaire. Ils raccourcissent chaque fois qu'une cellule se divise et, quand leur longueur descend sous un seuil critique, la cellule stoppe ses divisions pour entrer en sénescence. Après que les méditants eurent effectué une retraite, l'activité de la télomérase était plus élevée chez ceux dont le stress psychologique avait le plus diminué que chez les sujets d'un groupe témoin. Cette découverte suggère que la méditation de pleine conscience pourrait ralentir le vieillissement cellulaire chez certains pratiquants.

Un chemin vers le bien-être... et vers des sociétés meilleures ?

Près de 15 années de recherche révèlent qu'une pratique assidue de la méditation modifie l'organisme. Des études complémentaires sont nécessaires pour isoler les effets de cette pratique de ceux d'autres facteurs psychologiques. Par exemple, les résultats peuvent être influencés par le degré de motivation d'un pratiquant, par le charisme de l'enseignant ou par les échanges avec les autres élèves dans un groupe de méditation. De multiples paramètres restent également à étudier : éventuels effets négatifs, durée optimale des sessions, ajustements aux besoins individuels...

Quoi qu'il en soit, les recherches sur la méditation apportent de nouvelles connaissances sur les méthodes d'entraînement mental, susceptibles d'améliorer la santé et le bien-être. Non moins important, la compassion, avec d'autres qualités humaines, est le fondement d'un cadre éthique indépendant de toute philosophie ou religion, et leur développement par la méditation pourrait bénéficier à nos sociétés. ■

■ BIBLIOGRAPHIE

W. Hasenkamp *et al.*, *Mind wandering and attention during focused meditation : a fine-grained temporal analysis of fluctuating cognitive states*, *NeuroImage*, vol. 59(1), pp. 750-760, 2012.

Dossier *La méditation*, *Cerveau&Psycho*, n° 52, pp. 20-46, juillet-août 2012.

A. Lutz *et al.*, *Mental training enhances attentional stability : neural and behavioral evidence*, *Journal of Neuroscience*, vol. 29(42), pp. 13418-13427, 2009.

M. Ricard, *Plaidoyer pour le bonheur*, Nil Éditions, 2003.



Le noyau atomique

entre liquide et cristal

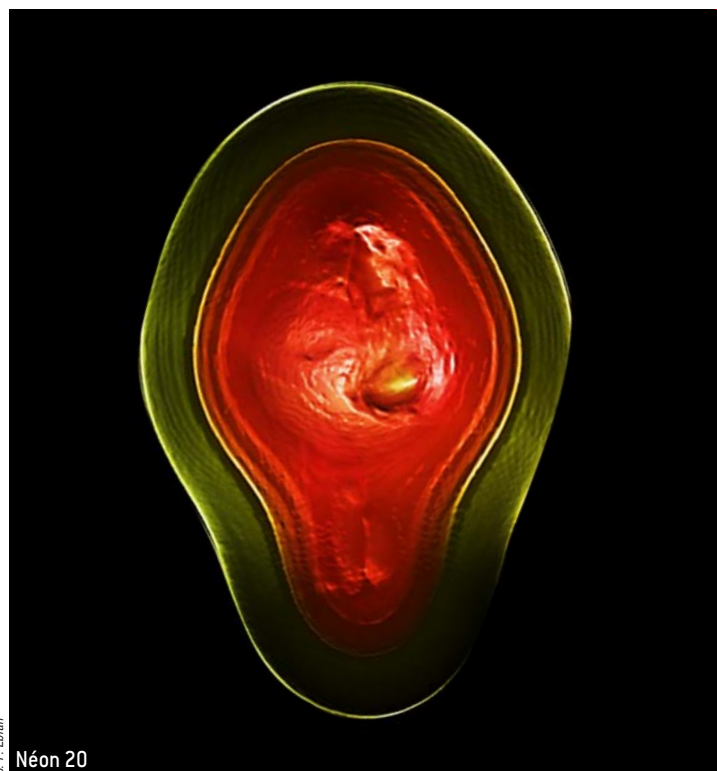
**Aplati, en poire, plutôt liquide, avec un halo... :
le noyau des atomes présente toute une variété
de formes et d'états. Une diversité
que les physiciens commencent à expliquer.**

Jean-Paul Ebran et Elias Khan

La matière qui nous entoure est composée d'atomes, mais à quoi ressemblent-ils ? Héritée du modèle du physicien néo-zélandais Ernest Rutherford (1871-1937), la représentation la plus courante d'un atome est celle d'un système planétaire microscopique, où des électrons sont en orbite autour d'un noyau sphérique. Avec la mécanique quantique, la représentation s'est affinée en faisant correspondre au cortège électronique un nuage (de densité de probabilité de présence des électrons) plutôt que des orbites. Quant au noyau atomique, est-il vraiment sphérique ? Les physiciens qui l'étudient en ont une image bien plus complexe. Les modèles théoriques et les expériences ont mis en évidence des noyaux aplatis, en bulle, en forme de poire ou de banane, des noyaux dont la structure rappelle celle des molécules (*voir les illustrations ci-contre*), etc.

Cependant, plus d'un siècle après sa découverte, le noyau atomique n'a pas livré tous ses secrets. Nous ne disposons pas d'une vision globale du noyau qui permette d'expliquer cette diversité de structures dans un cadre unique. Et pour cause, le noyau est un objet quantique difficile à étudier : il est constitué d'éléments eux-mêmes complexes, et trois des quatre forces fondamentales de la nature participent à la dynamique de cet assemblage.

L'idée que la variété découle d'un petit nombre de règles fondamentales n'est pas nouvelle. Les chimistes



J.-P. Ebran

Néon 20

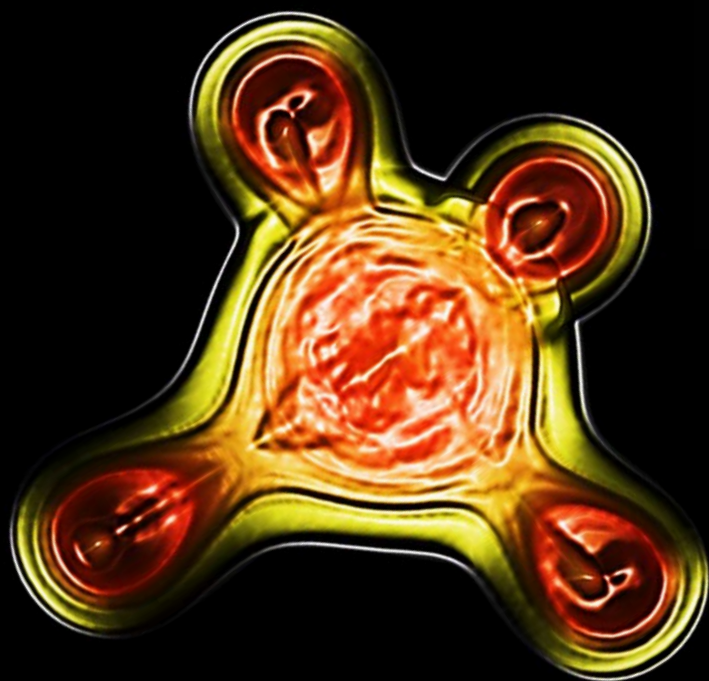
Carbone 12



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

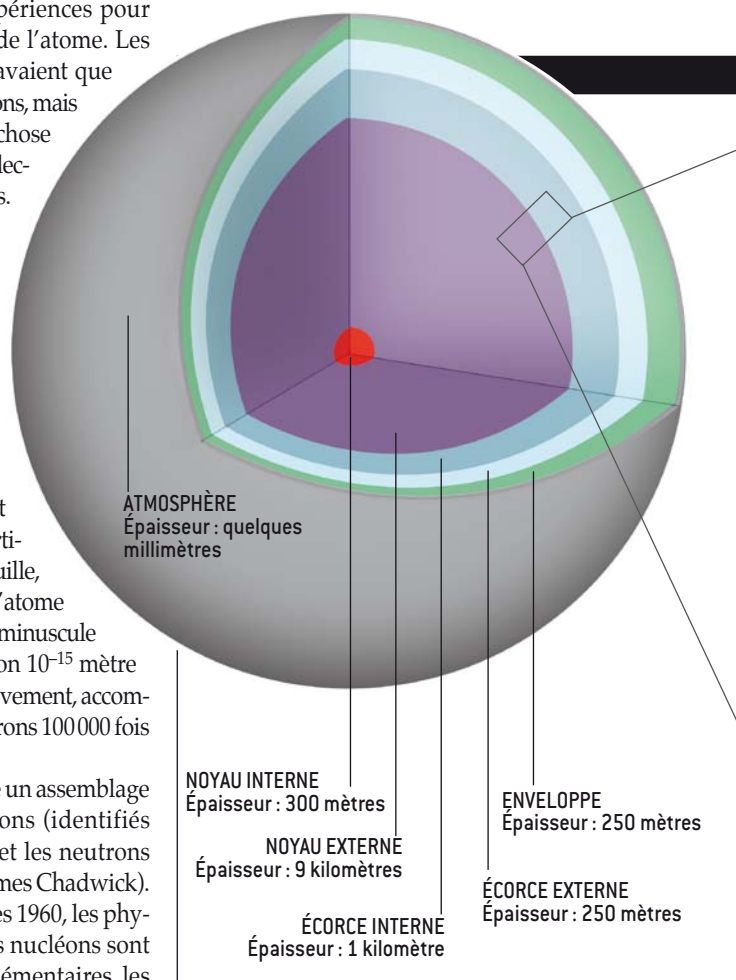
La vision que l'on a du noyau atomique n'a cessé d'évoluer depuis sa mise en évidence en 1911 par Rutherford. Ce physicien menait alors des expériences pour comprendre la structure de l'atome. Les chercheurs de l'époque savaient que l'atome contenait des électrons, mais il devait renfermer autre chose 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 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.

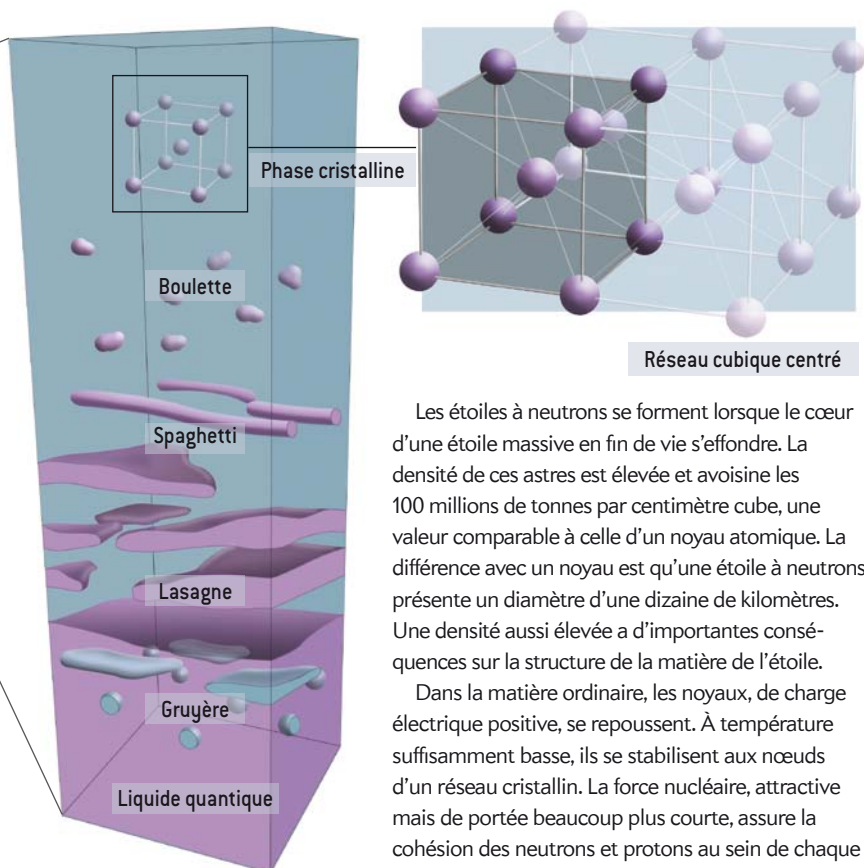
et de particule. Mathématiquement, ils sont décrits par une fonction d'onde qui détermine leur probabilité de présence : selon que cette fonction est concentrée dans l'espace ou étendue, chaque nucléon est plus ou moins bien localisé dans le noyau. Les interactions des nucléons influent directement sur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



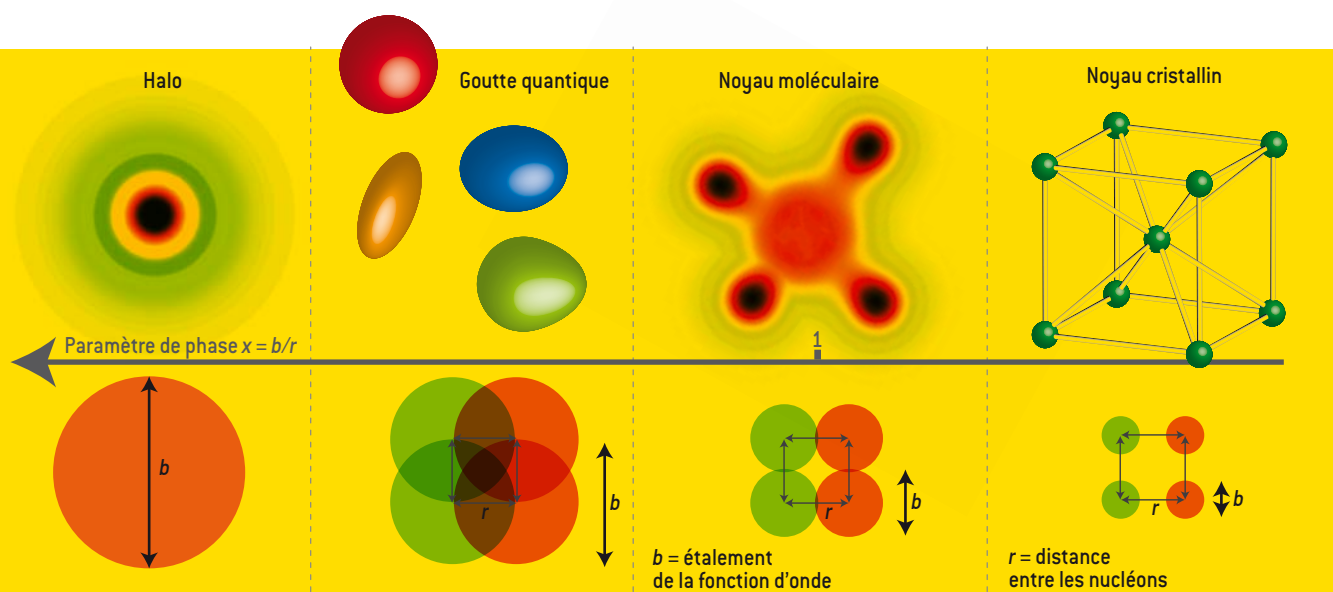
Les étoiles à neutrons se forment lorsque le cœur d'une étoile massive en fin de vie s'effondre. La densité de ces astres est élevée et avoisine les 100 millions de tonnes par centimètre cube, une valeur comparable à celle d'un noyau atomique. La différence avec un noyau est qu'une étoile à neutrons 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.



LES NOYAUX ATOMIQUES présentent une grande variété de structures qu'il est possible de classer à l'aide d'un paramètre dit de phase. Ce paramètre est le rapport de deux longueurs : l'étalement de la fonction d'onde décrivant l'état quantique de chaque nucléon (b) et la distance moyenne entre nucléons (r).

Dans la grande majorité des cas, les nucléons formant le noyau s'organisent dans une phase de liquide quantique. Il faut préciser que les nucléons sont des fermions, c'est-à-dire des particules dont le spin – le moment cinétique intrinsèque – est demi-entier (ici $1/2$) dans les unités atomiques. Les fermions identiques sont soumis au principe d'exclusion de Pauli qui leur interdit d'être dans un même état quantique.

L'approche phénoménologique du liquide quantique a été introduite par le physicien soviétique Lev Landau en 1956. Dans cette phase, l'interaction entre nucléons est importante, mais elle ne suffit pas pour dominer l'agitation de ces derniers. Elle rappelle la phase liquide de la matière ordinaire où les molécules sont en interaction mais où l'agitation thermique reste importante.

Comme les interactions des nucléons sont insuffisantes, ceux-ci sont délocalisés dans l'ensemble du volume du noyau. Leurs fonctions d'onde sont très étalées et se recouvrent, ce qui confère au noyau une densité relativement homogène.

De telles propriétés autorisent une description du noyau en terme de ce que l'on appelle le champ moyen : un puits de potentiel commun à tous les nucléons capture l'essentiel de la physique du système de nucléons en interaction. Ainsi, dans cette approche, chaque nucléon subit un même potentiel qui résume l'influence des autres particules.

La forme du potentiel nucléaire moyen n'est pas simple à définir, car il faut prendre en compte les spécificités de l'interaction forte et le fait que les nucléons engendrent eux-mêmes ce potentiel.

Cette approche a permis de décrire de nombreux phénomènes. Le noyau atomique, dans sa phase de type liquide quantique, présente une grande variété de comportements, comme le laisse supposer la malléabilité propre aux liquides. Ainsi, le noyau peut se déformer lorsqu'il est excité et, parfois, même dans son état de plus basse énergie (non excité), il n'est pas sphérique. Il peut alors adopter des formes exotiques, allant de la soucoupe au ballon de rugby en passant par une forme de poire (observée pour la première fois de façon directe en 2013 grâce à l'installation *Isolde* au Cern).

Des liquides quantiques superfluides

Outre les déformations, le modèle de liquide quantique décrit d'autres propriétés nucléaires. En raison de la nature fermionique des nucléons, on observe dans certains noyaux des corrélations entre deux nucléons. Cela conduit à la formation de paires de fermions, dites de Cooper, et à la superfluidité nucléaire. Ce processus est analogue aux paires de Cooper formées par les électrons dans les métaux supraconducteurs, mécanisme qui conduit à annuler la résistance électrique du matériau. La viscosité du liquide nucléaire diminue drastiquement s'il est superfluide. Cela a un impact sur le moment d'inertie, qui

7 000
noyaux instables.

Plus difficiles à étudier
et bien plus nombreux
que les noyaux stables,
ils pourraient révéler
de nouveaux états
de la matière.

détermine l'énergie du noyau en fonction de sa vitesse de rotation autour de lui-même. Ce phénomène doit être pris en compte lors des mesures en laboratoire.

Dans la phase liquide quantique, le puits de potentiel a une profondeur trop faible pour localiser les nucléons dans le noyau. Le paramètre de phase, le rapport de la dispersion spatiale de la fonction d'onde d'un nucléon et de la distance entre deux nucléons voisins, est alors très supérieur à un. Si le potentiel était profond, les nucléons seraient plus localisés, le paramètre de phase diminuerait et l'on tendrait vers une phase cristalline nucléaire, où les nucléons se situeraient aux mailles d'un réseau, comme dans un cristal.

Cette phase cristalline existe-t-elle dans la nature ? Voyons comment le paramètre de phase peut diminuer. Si le nombre de nucléons du noyau augmente, la profondeur du puits de potentiel augmente et le paramètre de phase diminue. Mais on obtient rapidement un effet de saturation, conséquence de la courte portée des forces s'exerçant entre les nucléons : la

profondeur du puits de potentiel atteint une valeur limite quasi indépendante du noyau considéré. Par ailleurs, on montre que la dispersion spatiale de la fonction d'onde augmente avec le nombre de nucléons. Finalement, un noyau riche en nucléons aura un comportement de liquide quantique et un paramètre de phase supérieur à un.

Un noyau léger ne contient pas suffisamment de nucléons pour former une structure cristalline. Cet état ne semble donc pas possible dans un noyau atomique. En revanche, il pourrait exister dans l'écorce des étoiles à neutrons. Prédites peu après la découverte du neutron dans les années 1930, ces étoiles sont restées hypothétiques jusqu'à ce que, en 1967, Jocelyn Bell, une doctorante, découvre les pulsars, caractérisés par une émission radio d'une période allant de quelques dizaines de millisecondes à quelques secondes. Un pulsar est une étoile à neutrons en rotation rapide émettant un jet qui balaie l'espace de façon périodique, comme un phare. On en a observé quelques milliers à l'heure actuelle.

De masse comparable à celle du Soleil mais avec un rayon d'une dizaine de kilomètres, les étoiles à neutrons sont parmi les objets les plus denses de l'Univers : un centimètre cube d'un tel astre pèse environ 100 millions de tonnes. Cette densité extrême est comparable à celle des noyaux atomiques. Ce lien entre la physique du noyau et l'astrophysique conduit à modéliser les étoiles à neutrons comme des sortes de noyaux géants. Or on calcule que les effets gravitationnels très intenses imposent dans les couches externes de ces étoiles une densité qui conduit à l'apparition de cristaux nucléaires (voir l'encadré page 32).

Ces étoiles pourraient héberger d'autres formes exotiques de la matière. Leur écorce présente une structure cristalline tandis que le noyau interne est décrit comme un liquide quantique nucléaire de plusieurs kilomètres de rayon. Entre ces deux régions, il existerait une phase hybride de type « molécule nucléaire ». Cette phase se caractérise par une dispersion de la fonction d'onde des nucléons du même ordre de grandeur que la distance

L'état de Hoyle, un noyau de carbone moléculaire

Quelques minutes après le Big Bang, à des températures de l'ordre de quelques milliards de degrés, les protons et les neutrons ont fusionné pour former de l'hydrogène, du deutérium (un isotope de l'hydrogène avec un neutron), de l'hélium et des traces de lithium 7. C'est la « nucléosynthèse primordiale ».

Aucun noyau doté de cinq ou huit nucléons n'est suffisamment stable pour que ce processus de fusion se poursuive vers les noyaux plus lourds. Ainsi, la fusion de deux noyaux d'hélium échoue. La nucléosynthèse primordiale du Big Bang s'arrête.

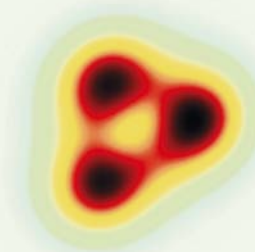
Les éléments plus lourds, tel le carbone, se forment bien plus tard dans les étoiles, qui présentent des températures et des densités élevées. La densité peut y être cent fois plus importante que dans l'Univers, lors de la nucléosynthèse primordiale. L'hydrogène est le combustible principal. L'énergie libérée lors de la fusion de noyaux crée une

pression de radiation qui s'oppose à l'effondrement gravitationnel de l'étoile. L'hydrogène est progressivement consommé et remplacé par de l'hélium. Mais quand l'hydrogène vient à manquer, la contraction de l'étoile reprend. La densité augmente et la fusion de l'hélium peut avoir lieu. Deux noyaux d'hélium fusionnent pour donner un noyau de béryllium 8, lequel fusionne à son tour avec un noyau d'hélium, ce qui donne un noyau de carbone 12. C'est la réaction dite triple α (car le noyau d'hélium est aussi nommé particule α).

Cette réaction est *a priori* peu probable, car le béryllium 8 est

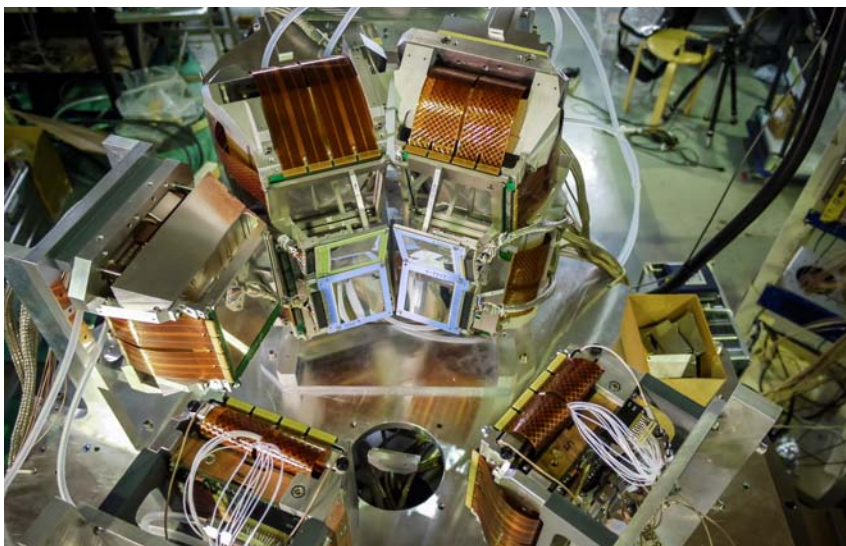
très instable et se désintègre la plupart du temps avant qu'une troisième particule α n'interagisse et fusionne avec lui. Un premier facteur facilite néanmoins cette réaction : l'état fondamental du béryllium 8 a quasiment la même énergie que deux particules α . Cela permet donc de produire facilement du béryllium 8, mais cela ne suffit pas pour produire du carbone 12.

En 1954, le physicien anglais Fred Hoyle a alors fait un raisonnement étonnant. Puisque nous observons du carbone dans l'Univers, la réaction triple α doit avoir lieu, donc le carbone 12 doit nécessairement présenter un état excité formé de trois particules α (dit état de Hoyle) dont l'énergie serait quasi égale à celle d'un atome de béryllium 8 et d'une particule α , ce qui faciliterait cette fusion (l'existence de cet état excité augmente la probabilité de formation du carbone 12). Cet



L'ÉTAT DE HOYLE est un noyau de carbone 12 excité, qui constitue un état moléculaire où les nucléons se regroupent en formant trois particules α .

état moléculaire n'a été mis en évidence que quelques mois après la prédiction de Hoyle. L'état excité est néanmoins instable et se décompose la plupart du temps en béryllium. Mais une fois sur 2500, le noyau se désexcite sans se désintégrer et forme un noyau stable de carbone 12. Cela ouvre ensuite la voie à la formation de l'oxygène et tous les éléments plus lourds.



LE NOYAU MOLÉCULAIRE est l'une des phases nucléaires les plus étonnantes, où les nucléons se regroupent en particules α (états liés de deux protons et deux neutrons). Ce serait le cas pour le carbone 12, qui contiendrait trois particules α , ou le néon 20, qui en contiendrait cinq. Pour identifier de tels états, les physiciens ont calculé que lorsque ces noyaux se désintègrent, ils émettent plus facilement une particule α , que le dispositif MUST2 (ci-dessus) au Ganil, à Caen, peut détecter.

moyenne qui les sépare (le paramètre de phase vaut environ un).

Cette phase moléculaire existe aussi dans certains noyaux formés de quelques dizaines de nucléons. Ces noyaux gagnent en stabilité lorsque les nucléons se regroupent en agrégats, chacun formant une particule α (deux protons et deux neutrons).

Ces noyaux moléculaires rappellent les molécules classiques constituées d'atomes, à la différence que les noyaux moléculaires sont 100 000 fois plus petits. En outre, les noyaux ayant peu de protons, mais un excédent de neutrons, ils développent facilement une structure en agrégats : les neutrons excédentaires, faiblement liés, se délocalisent entre les agrégats et jouent le même rôle stabilisateur que les électrons dans les liaisons de valence entre les atomes d'une molécule.

L'idée d'un noyau structuré en agrégats de nucléons remonte aux années 1930, quand les physiciens américains Lawrence Hafstad et Edward Teller ont proposé que les noyaux de béryllium 8, carbone 12, oxygène 16 et néon 20, qui ont autant de protons que de neutrons, pouvaient être décrits par des assemblages de particules α . Il faudra attendre les années 1960 pour voir l'élaboration des premiers outils théoriques dédiés à leur description et la mise en place d'expériences les révélant. C'est ainsi que l'on découvrit que les noyaux légers ayant un nombre égal de protons et de neutrons

ont tendance à exhiber des agrégats de nucléons dans leurs états excités.

L'existence du carbone 12 est la meilleure preuve que certains noyaux sont dans la phase moléculaire (voir l'encadré page 35). La synthèse de cet élément dans les étoiles passe par une réaction clé : la fusion de trois particules α qui produit un état excité, décrit comme un état moléculaire de trois particules α et nommé état de Hoyle. Sans la formation de cet état excité, la synthèse du carbone, de l'oxygène et de tous les éléments plus lourds serait bloquée.

Le halo : des neutrons très délocalisés

Notre approche fondée sur le paramètre de phase a permis de classer un grand nombre de configurations nucléaires selon trois phases. Ainsi, les noyaux riches en nucléons forment des liquides quantiques, tandis que les noyaux légers présentent parfois un comportement moléculaire.

Cependant, les noyaux atomiques peuvent se trouver dans d'autres états exotiques, tels les halos. En 1985, Isao Tanihata et ses collègues ont mesuré le rayon de plusieurs noyaux légers au Laboratoire Lawrence Berkeley, aux États-Unis. Le lithium 11 a un diamètre comparable à celui du plomb 208, alors qu'il a 20 fois moins de nucléons. Ce noyau est doté d'un halo formé par deux neutrons très délocalisés.

D'autres noyaux riches en neutrons exhibent aussi une structure de halo.

Cette délocalisation de la fonction d'onde de certains nucléons dans les noyaux à halo provient de leur faible énergie de liaison. Plusieurs observations directes de noyaux à halo ont été réalisées dans différents laboratoires dans le monde, comme au Ganil (Grand Accélérateur national d'ions lourds) en France. L'état de halo s'intègre dans notre description unifiée des divers états nucléaires. Il serait un cas extrême de délocalisation de la fonction d'onde de certains nucléons.

La difficulté expérimentale pour étudier de nouvelles formes nucléaires est qu'elles apparaissent dans des noyaux instables, dont la durée de vie est de l'ordre de quelques nanosecondes à quelques millisecondes. Ces noyaux se désintègrent en effet rapidement par interaction faible. Il en est ainsi pour les noyaux bulles, sortes de noyaux creux prédits par les théoriciens. La déplétion de matière en leur cœur est due à un effet spécifiquement quantique : la probabilité de présence des protons au centre du noyau est très faible – un effet surprenant, le cœur des noyaux atomiques étant en général ultradense.

Cet état serait un cas particulier des liquides quantiques. Certains indices expérimentaux de l'existence de noyaux bulles ont récemment été obtenus au Ganil. La prochaine étape consiste à mettre en évidence de façon directe le creux de matière au sein de ces noyaux, dont un candidat est le silicium 34 instable.

Les noyaux instables représentent 95 % des édifices nucléaires connus, alors que les noyaux stables, tel celui de l'oxygène que nous respirons, n'en constituent que 5 %. La physique nucléaire du XX^e siècle a été marquée par l'étude des 300 noyaux stables et a ouvert la voie à l'étude des noyaux instables. Les expériences de notre siècle s'orientent vers une étude systématique de ces derniers, qui se comptent par milliers. Les installations les plus récentes (ou en construction) au Japon, aux États-Unis et en Europe (France, Allemagne, Cern) permettront de se rapprocher de la limite théorique d'existence des noyaux, dont on estime le nombre total à environ 7 000.

Nous découvrirons alors peut-être de nouveaux états de la matière qui nécessiteront d'affiner nos modèles, voire des formes et états que les physiciens n'ont pas encore imaginés. ■

★ MUSÉE DU QUAI BRANLY
là où dialoguent les cultures



Week-end
gratuit

L'ETHNOLOGIE ★
VA VOUS SURPRENDRE !
Deux jours pour explorer le XXI^e siècle

Conférences | Débats | Projections
Lectures | Visites spéciales...



Avec la participation
de la
Comédie-Française

www.quaibranly.fr

14 et 15 mars 2015

#WeekendEthno

paris
ile-de-france



leRockuptibles

Libération

LE
HUFF
POST

SCIENCES
AVENIR

cnrs
le journal



Inca Kola. Marcos Lopez © musée du quai Branly

Kainua une ville étrusque sort de terre

Mal connue, la vie quotidienne étrusque se dévoile grâce aux fouilles d'une cité abandonnée au IV^e siècle avant notre ère. Parmi les découvertes : une villa d'architecture romaine, qui a donc deux siècles d'avance...

Martin Bentz

La confédération des 12 cités étrusques avait un sanctuaire fédéral, le *Fanum Voltumnae*. Dans son IV^e livre, Tite Live (-59 à 17) évoque plusieurs fois le temple du dieu suprême étrusque Voltumna, parce que l'on y prenait toutes les décisions concernant les intérêts panétrusques. Outre les grandes assemblées que l'on y convoquait, les Étrusques y organisaient un grand marché annuel et leurs jeux sportifs. Après l'absorption de l'Étrurie par Rome, le *Fanum Voltumnae* a sombré dans l'oubli. À partir du XIV^e siècle, les érudits européens se sont interrogés sur son emplacement et l'ont recherché en vain...

Pour les étruscologues, l'égarement du *Fanum Voltumnae* dans les limbes du temps, c'est un peu comme si l'on ignorait où se trouvent la Delphes des Grecs ou la Rome des catholiques... Après l'avoir recherché des siècles durant, ils ont fini par penser que si ses traces ont disparu, c'est parce que le grand sanctuaire était bâti en matériaux périssables... Cependant Simonetta Stopponi, n'y croyait pas.

Cette archéologue de l'Université de Pérouse s'est acharnée à traquer le *Fanum Voltumnae* jusqu'à découvrir récemment un site prometteur près de la ville d'Orvieto. L'endroit pourrait en effet bien correspondre au grand sanctuaire, puisqu'on y a trouvé une allée processionnelle et des monceaux de restes d'offrandes. L'archéologie étrusque réserve encore des surprises...

Pour autant, de nombreux aspects de la vie étrusque paraissaient perdus à jamais, notamment parce que les informations dont nous disposons proviennent presque seulement des nécropoles et des textes. Cette impression se relativise cependant, en particulier grâce aux progrès dans la connaissance de Kainua, une cité étrusque abandonnée qui – fait exceptionnel – n'a pas été recouverte à l'époque romaine. Quels sont les éléments nouveaux apportés par ces fouilles, auxquelles nous avons eu la chance de participer ? Avant de les présenter, résumons nos connaissances essentielles sur les Étrusques.

Les Étrusques se nommaient eux-mêmes *Rasna* ou *Rasenna* ; les Grecs les

CE PERSONNAGE ÉTRUSQUE
est représenté sur le couvercle de ce sarcophage en albâtre du III^e siècle avant notre ère, découvert à Colle del Vescovo. Manifestement, l'artiste a cherché à exprimer la dignité et l'opulence du défunt.