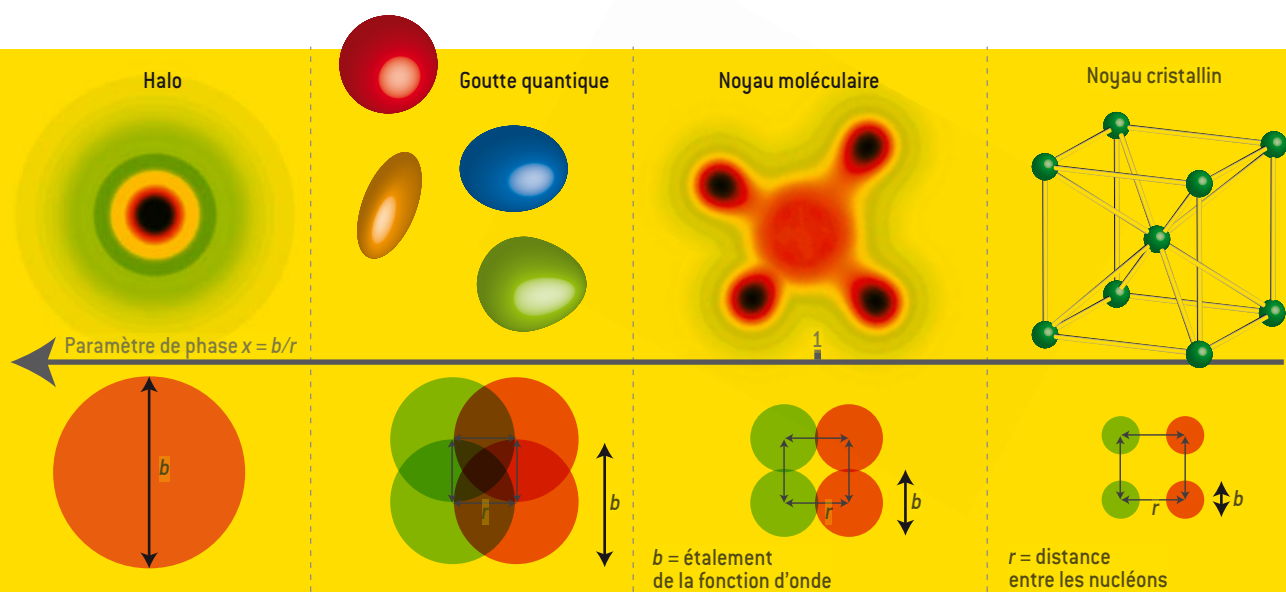




LES NOYAUX ATOMIQUES présentent une grande variété de structures qu'il est possible de classer à l'aide d'un paramètre dit de phase. Ce paramètre est le rapport de deux longueurs : l'étalement de la fonction d'onde décrivant l'état quantique de chaque nucléon (b) et la distance moyenne entre nucléons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

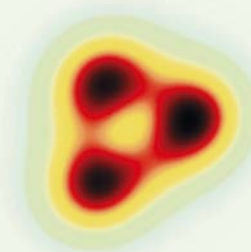
Les éléments plus lourds, tel le carbone, se forment bien plus tard dans les étoiles, qui présentent des températures et des densités élevées. La densité peut y être cent fois plus importante que dans l'Univers, lors de la nucléosynthèse primordiale. L'hydrogène est le combustible principal. L'énergie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