

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.

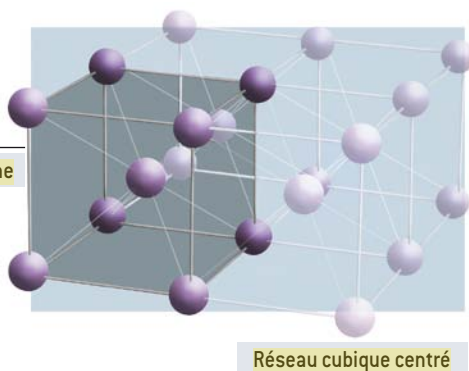
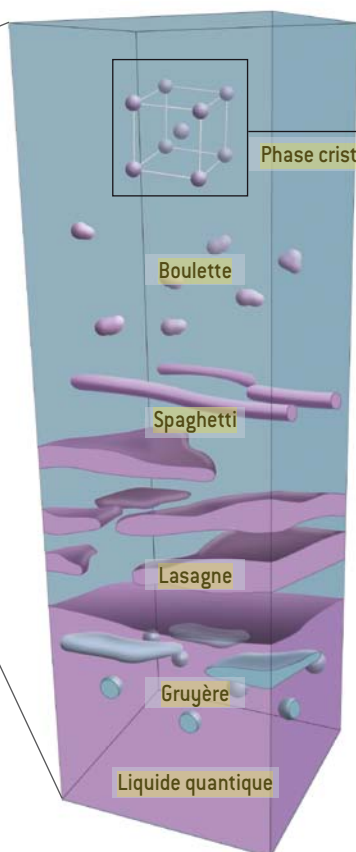
et de particule. Mathématiquement, ils sont décrits par une fonction d'onde qui détermine leur probabilité de présence : selon que cette fonction est concentrée dans l'espace ou étendue, chaque nucléon est plus ou moins bien localisé dans le noyau. Les interactions des nucléons influent directement sur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



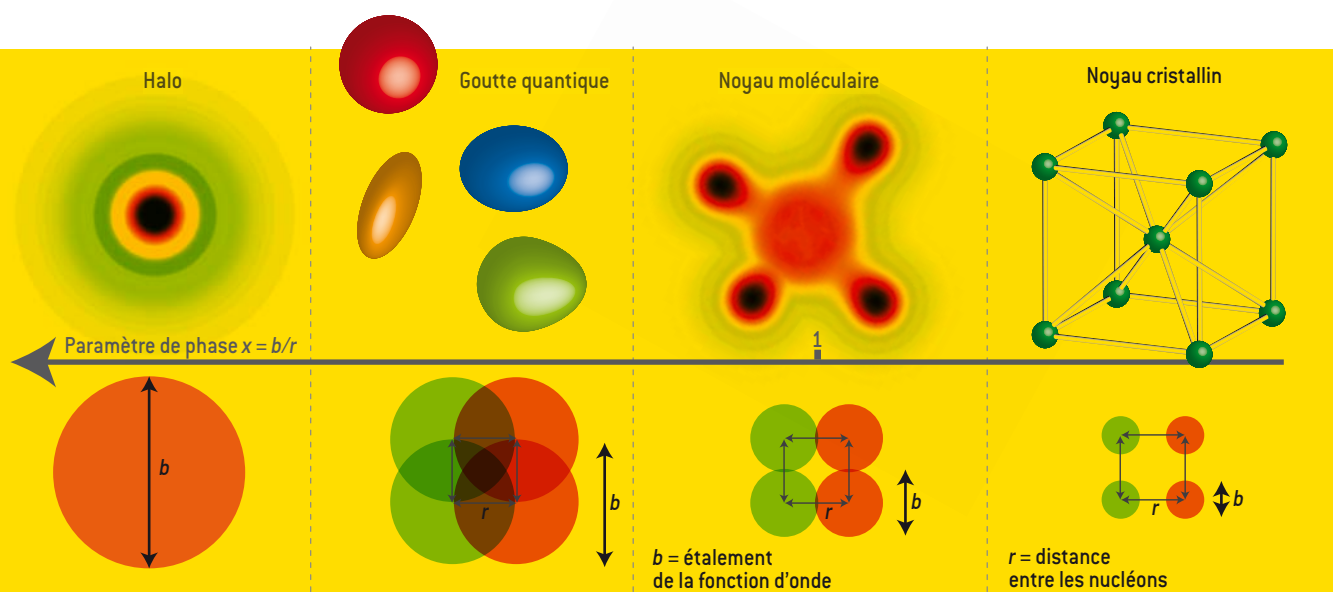
Les étoiles à neutrons se forment lorsque le cœur d'une étoile massive en fin de vie s'effondre. La densité de ces astres est élevée et avoisine les 100 millions de tonnes par centimètre cube, une valeur comparable à celle d'un noyau atomique. La différence avec un noyau est qu'une étoile à neutrons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