

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.

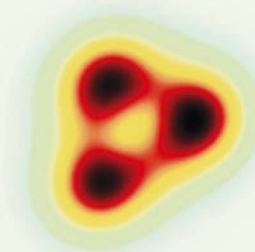
Les éléments plus lourds, tel le carbone, se forment bien plus tard dans les étoiles, qui présentent des températures et des densités élevées. La densité peut y être cent fois plus importante que dans l'Univers, lors de la nucléosynthèse primordiale. L'hydrogène est le combustible principal. L'énergie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

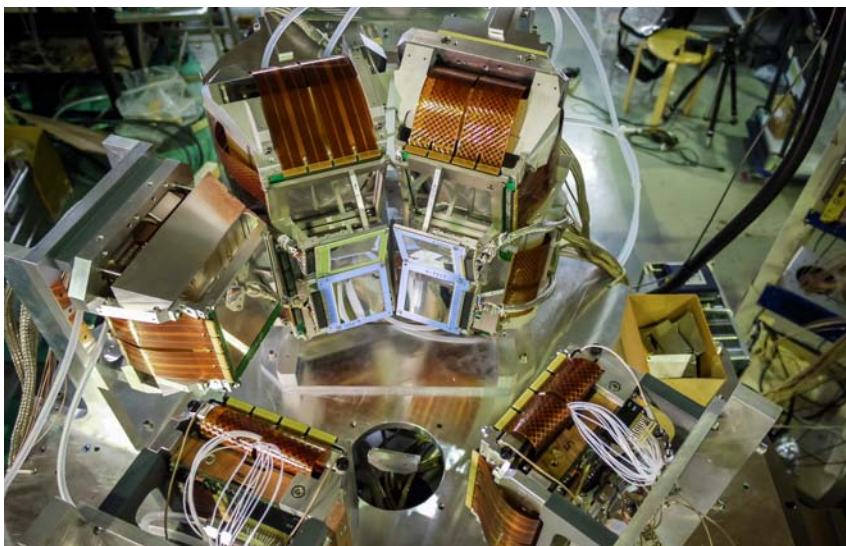
très instable et se désintègre la plupart du temps avant qu'une troisième particule α n'interagisse et fusionne avec lui. Un premier facteur facilite néanmoins cette réaction : l'état fondamental du béryllium 8 a quasiment la même énergie que deux particules α . Cela permet donc de produire facilement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