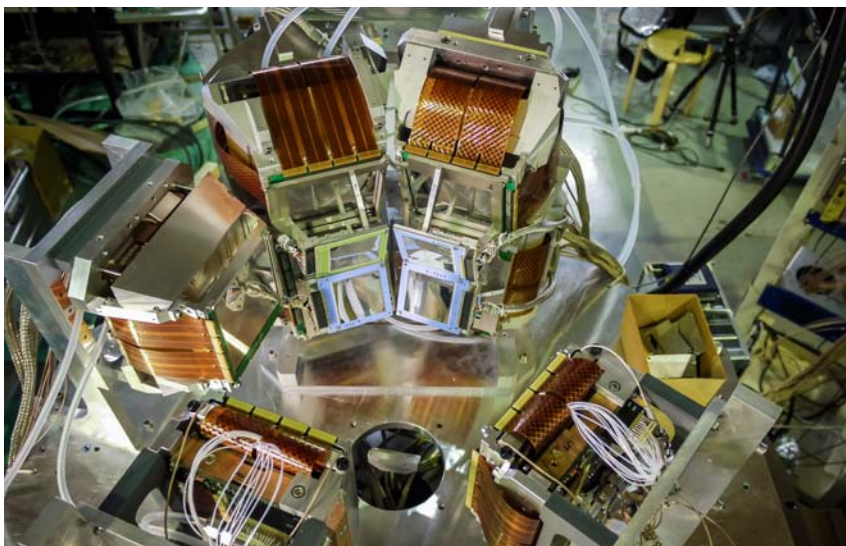




LE NOYAU MOLÉCULAIRE est l'une des phases nucléaires les plus étonnantes, où les nucléons se regroupent en particules α (états liés de deux protons et deux neutrons). Ce serait le cas pour le carbone 12, qui contiendrait trois particules α , ou le néon 20, qui en contiendrait cinq. Pour identifier de 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. ■