

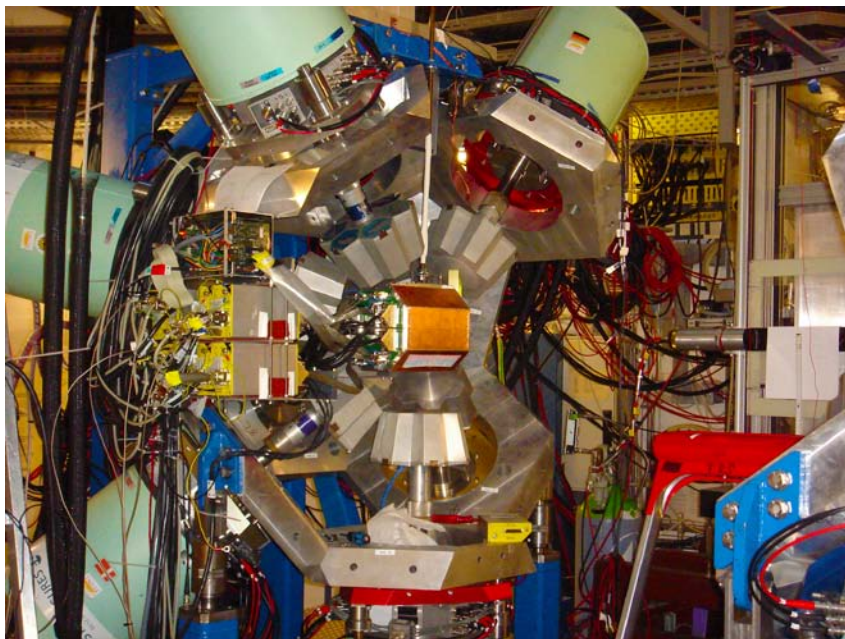
cinétique total, noté j , est égal soit à $l - 1/2$, soit à $l + 1/2$ (pour l fixé).

On montre notamment que les nucléons sont plus fortement liés si leurs spins et moments cinétiques orbitaux sont parallèles: le niveau d'énergie correspondant à $j = l + 1/2$ est donc plus bas que pour $j = l - 1/2$. La prise en compte du couplage spin-orbite dans le calcul de l'énergie des couches révèle par ailleurs que l'écart d'énergie peut être important. Prenons ainsi le cas du noyau d'étain, qui a 50 protons. La dernière couche de protons correspond à $l = 4$ et à un spin des protons parallèle à l ; elle est notée $g_{9/2}$. Elle est saturée, c'est-à-dire complètement remplie, et séparée par un grand écart d'énergie de la couche immédiatement supérieure $g_{7/2}$ correspondant à un spin antiparallèle. Dans ce noyau, il faut donc beaucoup d'énergie pour que l'un des protons passe de la couche $g_{9/2}$ à la couche $g_{7/2}$, ce qui explique que 50 soit un nombre magique. Et l'étain 100 est doublement magique, car cette situation se produit à la fois pour les protons et pour les neutrons (voir la figure 2).

L'étain 100 est un noyau intéressant tant pour les théoriciens que pour les expérimentateurs. En effet, les calculs du modèle en couches des noyaux comportant un grand nombre de nucléons sont si lourds et complexes que, même avec les ordinateurs actuels, les physiciens sont obligés de faire des hypothèses simplificatrices pour espérer les mener à bien. Dans le même temps, on manque de mesures pour préciser les paramètres dont dépend le modèle. C'est là que les noyaux magiques viennent à la rescousse: en raison de la saturation de leurs couches de nucléons, les calculs sont facilités. De ce fait, ils mettent davantage à notre portée un modèle nucléaire trop complexe pour être testé sur n'importe quel noyau.

Le noyau d'étain 100, noté $^{100}_{50}\text{Sn}_{50}$ (50 protons et 50 neutrons, soit 100 nucléons), ne livre cependant pas facilement ses secrets! D'abord, pour l'obtenir, il faut, dans le cours d'une chaîne de réactions nucléaires, rechercher parmi une multitude de produits les noyaux qui ont perdu exactement les bons nombres de protons et de neutrons pour former de l'étain 100.

Dans le cadre d'une vaste collaboration internationale associant des chercheurs de plusieurs pays européens, du Japon et des États-Unis, nous avons voulu jouer à ce jeu afin de mesurer plus précisément les propriétés de l'étain 100. J'ai donc demandé à



Thomas Faestermann

4. POUR ÉTUDIER LA DÉSINTÉGRATION BÊTA DE L'ÉTAIN 100, des noyaux de cet isotope sont introduits dans le détecteur SIMBA (boîtier couleur cuivre au centre du cliché ci-dessus). SIMBA est entouré de 15 détecteurs au germanium destinés à mesurer les énergies des rayons gamma (boîtiers gris). Ici, la partie antérieure de l'installation a été retirée avant la prise de vue.

Le noyau de A à Z

Le numéro atomique d'un élément chimique, c'est-à-dire le nombre de protons de son noyau, est noté Z. Le nombre total de nucléons de son noyau est noté A et nommé nombre de masse (car c'est aussi la masse en grammes d'une mole d'atomes de l'élément considéré, soit $6,022 \times 10^{23}$ noyaux, la masse des électrons étant négligeable). Il est aussi d'usage d'écrire $A = Z + N$, où N est le nombre de neutrons. La notation complète d'un noyau atomique est donc ^A_ZS , où S est le symbole chimique de l'élément considéré.

pouvoir employer l'accélérateur du Centre de recherche sur les ions lourds de Darmstadt, connu aussi sous l'acronyme GSI (Gesellschaft für Schwerionenforschung). Nommée UNILAC, cette machine a été construite pour accélérer des ions lourds, qui sont acheminés dans un synchrotron – le synchrotron SIS –, où ils sont encore accélérés (voir les figures 3 et 4). On nous accorda une durée exceptionnelle de 21 jours du temps de cette machine.

Une forte probabilité de désintégration

Par rapport aux éléments naturels comparables, tel l'isotope du molybdène à 100 nucléons mais seulement 42 protons, l'étain 100 a des protons en excès. Pour cette raison, il peut subir une désintégration bêta, au cours de laquelle il émet un positron (l'antiparticule de l'électron) et un neutrino, tandis que l'un des protons du noyau se transforme en un neutron. Ainsi, $^{100}_{50}\text{Sn}_{50}$ se transforme en l'élément qui le précède dans le tableau périodique des éléments, à savoir $^{100}_{49}\text{In}_{51}$, un isotope de l'indium ayant 49 protons et 51 neutrons. Les règles de la désintégration bêta imposent en outre que l'isotope d'indium produit se trouve dans un état excité où le moment cinétique du noyau n'est pas nul, mais vaut 1.

Or d'après les théoriciens, cette transition de l'isotope instable de l'étain à l'isotope d'indium excité devrait se produire très souvent : elle a une probabilité élevée, que les spécialistes traduisent par la « force de transition », une grandeur apparentée (voir l'encadré page 35). Jusqu'à présent, cette force de transition n'a pu être déterminée de façon très fiable. Or la comparaison de ses valeurs théoriques et expérimentales renseignerait sur l'effica-

cité avec laquelle les calculs modernes du modèle en couches décrivent le noyau. Plus ces valeurs seront proches, plus les calculs décrivant les noyaux à nombres voisins de nucléons deviendront fiables – ce qui est précieux, ces noyaux étant plus difficiles à étudier expérimentalement.

Plus la force de transition est élevée, plus la durée de vie de l'état initial est brève, et plus l'énergie de désintégration est faible. Dans la désintégration bêta, l'énergie libé-

rée se répartit entre le positron et le neutrino émis. À l'origine, on ne tentait même pas de détecter les neutrinos, car même de gigantesques détecteurs souterrains n'enregistrent qu'une toute petite fraction de ces particules évanescences. Mais ce n'était pas un problème, puisqu'il arrive aux positrons d'emporter pratiquement toute l'énergie de la désintégration : il suffit donc de détecter les plus énergétiques d'entre eux pour connaître précisément cette énergie. La connaissance de la durée de vie et de l'énergie de désintégration permet alors d'en déduire la force de transition. Cependant, il faut encore vérifier que toutes les désintégrations bêta conduisent au même état excité. Cette information est contenue dans le rayonnement gamma émis lorsque l'indium 100 produit passe de son état excité à son état fondamental.

L'étain 100, une exception bienvenue

Une désintégration bêta aussi intense que celle du noyau d'étain 100 n'est envisageable que dans le cas de cet isotope. Tous les noyaux plus légers, doublement magiques et à mêmes nombres de protons et de neutrons, soit sont stables (tels $^{16}_8\text{O}_8$ ou $^{40}_{20}\text{Ca}_{20}$), soit ont une énergie de désintégration trop petite pour que la force de transition soit élevée (tel $^{56}_{28}\text{Ni}_{28}$). Par ailleurs, au-delà de l'étain 100, il n'existe aucun noyau doublement magique dont les nombres de protons et de neutrons sont égaux. Le candidat suivant serait le plomb 164 avec 82 protons et 82 neutrons, mais il ne saurait être stable car la répulsion électrostatique entre protons y serait trop forte.

Comment obtient-on un noyau riche en protons tel que l'étain 100 ? Deux mécanismes de réaction sont employés. Le premier est la fusion de deux noyaux de masses à peu près égales, tels le chrome 50 et le nickel 58. Pour vaincre la répulsion électrostatique entre noyaux, on accélère le nickel 58 jusqu'à un dixième de la vitesse de la lumière, puis on le précipite sur une feuille contenant des atomes de chrome 50. Les noyaux fusionnent alors, et des noyaux excités d'étain 108 se forment. Ce dernier se débarrasse ensuite de son énergie excédentaire en éjectant des protons et des neutrons, processus qui produit, entre autres, des noyaux d'étain 100.

Le second mécanisme est la fragmentation. Elle consiste à projeter un noyau lourd, du xénon 124 par exemple, sur une

TIRER, TRIER, FREINER ET MESURER

Pour étudier l'étain 100, on commence par accélérer des ions de xénon à 16 pour cent de la vitesse de la lumière, avec l'accélérateur UNILAC. Ces ions sont ensuite introduits dans le synchrotron SIS, qui porte leur vitesse à 88 pour cent de celle de la lumière. Une fois sortis de SIS, les ions de xénon sont dirigés vers un bloc de béryllium, où les réactions entre noyaux produisent des noyaux plus légers et épluchés de tous leurs électrons.

Ces noyaux sont ensuite introduits dans le séparateur de fragment FRS, où deux premiers aimants leur confèrent des trajectoires différentes en fonction de leurs masses et de leurs charges.

Ainsi triés, ces noyaux parviennent dans un bloc d'aluminium, qu'ils freinent différemment suivant le nombre de nucléons qu'ils contiennent. Deux autres aimants séparent ensuite ces nucléides, puis des mesures permettent de déterminer le rayon de leurs trajectoires circulaires (les champs magnétiques font parcourir des cercles aux particules chargées) et, de là, au paramètre A/Z . Simultanément, une mesure du temps de vol livre la vitesse d'arrivée des noyaux, tandis que leur charge est déduite de la mesure de l'énergie perdue par les noyaux dans un détecteur à gaz.

Finalement, les ions triés sortent de FRS et s'immobilisent

au sein du détecteur à implantation SIMBA, composé d'un empilement de 25 détecteurs au silicium. Dans les deux premiers sont déterminées les coordonnées dans les directions horizontales. Les ions s'arrêtent ensuite dans l'un des trois détecteurs de la zone dite d'arrêt, où leur position est à nouveau mesurée, et cette fois aussi dans la direction verticale. Là, ils se décomposent en émettant des particules bêta (ici des positrons) dans la direction verticale. Leur énergie est mesurée par deux détecteurs supplémentaires. Les détecteurs disposés autour de SIMBA mesurent l'énergie des rayons gamma émis lors de la désexcitation des noyaux produits.

