

épaisse tôle après l'avoir accéléré jusqu'à 40-90 pour cent de la vitesse de la lumière. Le noyau lourd y heurte certains des noyaux de la cible, et perd des nucléons. Éventuellement, le noyau résiduel émet à son tour des nucléons. De cette façon, on obtient à partir d'un faisceau de noyaux lourds beaucoup de noyaux plus légers, parmi lesquels de l'étain 100. Le grand avantage de cette méthode est que les atomes résiduels continuent leur vol avec une vitesse proche de la vitesse initiale, de sorte qu'il reste possible de les trier à l'aide de champs magnétiques défecteurs, puis de les diriger vers des détecteurs conçus pour eux.

Dans les années 1990, à l'Institut de physique nucléaire de l'Université de Munich, nous avons mené une telle expérience de fragmentation. Mon collègue Jürgen Friesse a ensuite pris l'initiative de proposer au GSI de Darmstadt de produire des noyaux d'étain 100, de les stopper et de mesurer les caractéristiques de leur désintégration bêta. C'est ainsi qu'en 1994, avec l'équipe du séparateur de fragments du GSI, nous avons réussi à identifier neuf atomes d'étain 100. Six d'entre eux ont pu être stoppés dans un détecteur afin de mesurer leur énergie de désintégration bêta et leur durée de vie.

Nous avons ainsi obtenu la première estimation grossière de la durée de vie et

de l'énergie de transition de l'étain 100 – respectivement 0,9 seconde et 3,4 mégaélectronvolts –, résultats à partir desquels un calcul simple livre la force de transition. Malheureusement, la précision de ces résultats était encore trop faible pour confirmer que la force de transition est aussi élevée que le prédit la théorie. Il fallait davantage de données.

Plusieurs expériences

Quelques semaines seulement après nous, une équipe du GANIL (Grand accélérateur national d'ions lourds, à Caen) réalisa une nouvelle expérience de fragmentation, durant laquelle des noyaux d'étain 100 ont été identifiés. Les caractéristiques de leur désintégration ne purent cependant pas être mesurées.

Le résultat suivant vint en 1996, année où une autre équipe réussit à produire au GANIL des noyaux de nombre de masse 100 et du cadmium 100, mais cette fois par fusion. Les chercheurs réussirent aussi à mesurer la différence de masse entre l'étain 100 et le noyau d'indium produit par sa désintégration. Or selon la relation d'équivalence entre la masse et l'énergie d'Einstein, cette différence de masse représente la somme de l'énergie libérée par la désintégration bêta et

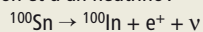
de l'énergie emportée par les rayonnements gamma émis par l'indium 100 en se désexcitant. Les résultats ainsi obtenus recoupaient les nôtres, et la précision de l'expérience était également à peu près comparable. Une nouvelle valeur de la demi-vie (temps au bout duquel la moitié des noyaux initiaux se sont désintégrés) fut obtenue en 2008 au Laboratoire américain du cyclotron superconducteur (*National Superconducting Cyclotron Laboratory* ou NSCL), à l'Université du Michigan aux États-Unis.

La même année, nous avons relancé nos expériences. Entre-temps, les accélérateurs du GSI avaient été optimisés, de sorte que nous espérions créer et identifier avec certitude au minimum un noyau d'étain 100 par heure. En 2004, les équipes participant au projet européen *Euroball* de développement de détecteurs de rayons gamma ont commencé à en installer un grand nombre au GSI, de sorte que 15 de ces machines ont pu être disposées autour du détecteur principal, y formant une grande sphère creuse dénommée *RISING* (de l'anglais *Rare Isotope Spectroscopic Investigations at GSI*).

À cela près, notre nouvelle expérience (voir l'encadré page 34) ressemblait beaucoup à la première. Comme projectile, nous avons à nouveau utilisé des ions de xénon 124, lesquels ont quatre protons et

Calculer la force de transition de la désintégration bêta

Noté ^{100}Sn , l'étain 100 est un noyau paradoxal. Ce noyau doublement magique, très sphérique et très stable vis-à-vis de l'interaction forte (responsable des désintégrations alpha ou gamma), est en même temps instable vis-à-vis de l'interaction faible (désintégration bêta). Concrètement, cela signifie qu'à peine formé, l'étain 100 se transforme en un noyau d'indium 100, noté ^{100}In , avec émission d'un positron et d'un neutrino :



Ce processus de désintégration bêta, où les spins du positron et du neutrino sont parallèles, est ce que les physiciens nomment une transition de Gamow-Teller. Pour la caractériser, on calcule sa probabilité de transition partielle λ_{GT} , c'est-à-dire la probabilité qu'à une énergie disponible donnée E (différence entre l'énergie du noyau ^{100}Sn et celle de ^{100}In , à la-

quelle on soustrait l'énergie emportée par le positron et le neutrino), l'étain 100 passe de son état initial i à l'état final f (noyau d'indium 100 excité) tout en émettant un positron et un neutrino.

En tenant compte des lois de conservation de l'énergie, du moment cinétique et du spin, on peut montrer que cette probabilité est égale, à un facteur près, à la grandeur que l'auteur de l'article nomme force de transition :

$$\lambda_{\text{GT}} = g(E) \times F_{\text{transition}}$$

où le facteur $g(E)$ ne dépend que de l'énergie disponible E .

Or la probabilité de transition partielle λ_{GT} est constante dans le temps. Il s'ensuit que le nombre de noyaux ^{100}Sn d'une population initiale décroît exponentiellement dans le temps, c'est-à-dire qu'il est proportionnel à $\exp(-\lambda_{\text{GT}}t)$, où t est le temps écoulé. La demi-vie,

qui est le temps T au bout duquel la population initiale aura diminué de moitié, est donnée alors par :

$$T = \ln 2 / \lambda_{\text{GT}} = [\ln 2 / g(E)] / F_{\text{transition}}$$

En pratique, on doit tenir compte de tous les états finaux possibles, mais il reste vrai, comme l'écrit Thomas Faestermann, que la durée de vie de ^{100}Sn est inversement proportionnelle à la force de transition de sa désintégration bêta.

Les calculs montrent que cette force de transition est la plus intense que l'on connaisse. C'est cette particularité qu'ont confirmée les expériences menées à l'initiative de Th. Faestermann et rapportées dans l'article. S'il en est ainsi, alors il est clair que la probabilité de désintégration bêta de l'étain 100 est aussi la plus élevée, de sorte que l'on parle à son propos de transition de Gamow-Teller superpermissible.

En pratique, la force de transition d'une désintégration bêta est difficile à calculer, car il y a un trop grand nombre d'états initiaux et finaux possibles à prendre en compte. Toutefois, le caractère doublement magique de l'étain 100 fait jouer un rôle déterminant à l'une des configurations décrites dans le modèle en couches. On peut alors se limiter à des états initiaux et finaux représentés par des vecteurs ayant « seulement » un milliard de composantes... à la limite de ce qui est techniquement possible ! Ces calculs ainsi simplifiés, mais pas simples, fournissent la force de transition théorique avec une précision suffisante pour qu'on puisse confronter le modèle théorique aux mesures expérimentales.

Frédéric Nowacki
CNRS, Institut Hubert Curien,
Strasbourg

20 neutrons de plus que l'étain 100. Nous avons accéléré les ions jusqu'à 88 pour cent de la vitesse de la lumière dans le synchrotron, avant de les précipiter sur un bloc de béryllium. La fragmentation des noyaux de xénon 124 sur les noyaux de béryllium a produit de nouveaux noyaux. Malgré les deux centimètres d'épaisseur de la cible de béryllium, les ions formés en ressortaient à peine ralentis, mais avaient en revanche perdu tous leurs électrons, de sorte qu'ils étaient fortement chargés positivement.

Nous avons ensuite utilisé le séparateur de fragment FRS (*Fragment separator*). Long de 72 mètres, constitué de quatre aimants défecteurs et de nombreux aimants de focalisation, ce dispositif est conçu pour extraire les noyaux recherchés. Au sein du FRS, les ions parcourent des trajectoires dont la courbure dépend du rapport nombre de masse/numéro atomique. Entre le deuxième et le troisième aimant de FRS, ils traversent un bloc d'aluminium de deux centimètres. Ils y sont freinés, et cela d'autant plus que leur charge est élevée. L'aimant suivant les trie ensuite d'après leur charge électrique.

Afin d'être certains de ce que nous faisons, nous utilisons pour chacune des mesures nécessaires au moins deux détecteurs, certains faisant partie de l'équipement du FRS et d'autres que nous avons déve-

loppés. Après avoir réglé spécifiquement le FRS aux recherches de l'étain 100, nous avons obtenu 259 de ces noyaux en deux semaines (voir la figure 5). Nous avons même réalisé une première mondiale en identifiant des noyaux d'étain 99, d'indium 97 et de cadmium 95, qui comportent plus de protons que de neutrons. Dans le cas de l'indium 97, la répulsion électrostatique entre les protons est si forte que ces noyaux perdent sans doute spontanément un proton.

La seule identification de noyaux

LA SEULE IDENTIFICATION DE NOYAUX d'étain 100 ne pouvait nous suffire ; il fallait aussi savoir comment ils se désintègrent.

d'étain 100 ne pouvait nous suffire ; il fallait aussi savoir comment ils se désintègrent. Nous avons donc laissé les noyaux formés voler jusqu'à notre détecteur à implantation SIMBA (*Silicon IMplantation detector and Beta Absorber*). Auparavant, ils passaient à travers une couche de matériau d'épaisseur variable, qui les freinait juste assez pour qu'ils s'arrêtent à l'endroit souhaité dans l'instrument.

SIMBA est fondé sur le détecteur que nous avons déjà développé pour l'expérience des années 1990. Il comporte 25 détecteurs au silicium de grande surface, chacun d'un demi-millimètre d'épaisseur. Les deux

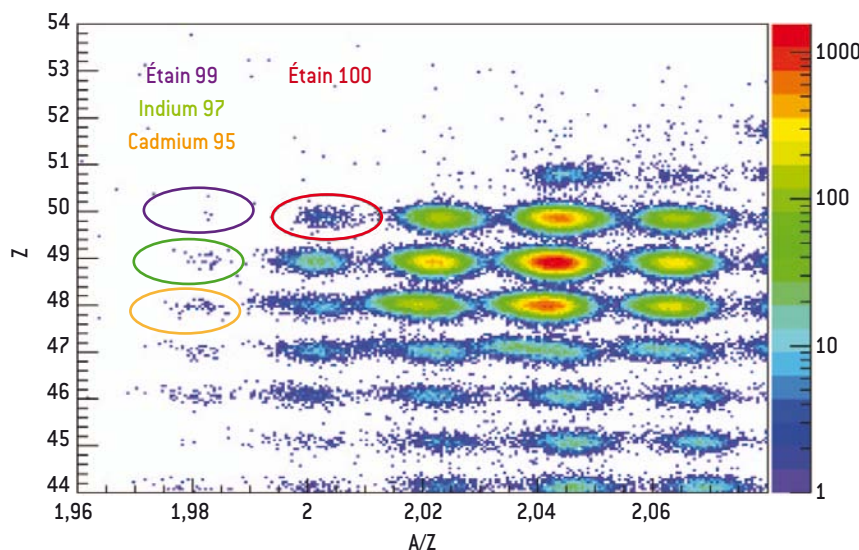
premiers mesurent la position horizontale et verticale du point où les noyaux pénètrent dans le détecteur. Les trois suivants constituent la zone d'arrêt ; ils enregistrent en trois dimensions la position où s'immobilise le noyau, et cela avec une précision de un millimètre dans les directions horizontale et verticale. On établit qu'un noyau s'est immobilisé dans un certain détecteur lorsque le suivant n'enregistre rien.

Que faire s'agissant des particules issues de la désintégration bêta ? Nous avons considéré que la présence de l'une d'elles au voisinage de la position d'arrêt suffit pour considérer qu'elle provient, avec une haute probabilité, de la désintégration du noyau venant de s'arrêter. Leur énergie ne représente que le 1/300^e de l'énergie que le noyau a cédée au dernier détecteur. Pour stopper aussi ces particules dont la portée est bien plus grande que le millimètre, nous avons placé derrière la zone d'arrêt dix détecteurs au silicium au sein desquels les particules bêta (ici des positrons) perdent toute leur énergie. En faisant la somme des différentes valeurs mesurées, nous pouvions reconstituer le spectre d'énergie des particules bêta. Enfin, l'installation RISING permettait de mesurer en parallèle les énergies des rayons gamma.

Les propriétés du noyau ¹⁰⁰Sn se révèlent

De retour à Munich, nos doctorants Katrin Straub et Christoph Hinke ont entamé l'analyse des données. Nous nous demandions avec inquiétude si tous les détecteurs avaient fonctionné comme prévu, mais tout allait bien ! Nous avons déduit la demi-vie des noyaux d'étain 100 des intervalles de temps écoulés entre l'arrivée d'un ion dans le détecteur et la détection d'une particule bêta ; le résultat était 1,16 seconde à 0,20 seconde près. Cette valeur était compatible avec la précédente mesure, mais plus précise.

Nous avons en outre obtenu un spectre des rayonnements gamma émis. On y observe cinq raies, qui traduisent les états d'énergie qui participent à la transition entre l'indium excité et l'indium dans son état fondamental. Chaque raie correspond à la transition entre deux états d'énergie du noyau. On peut déduire de ces informations un schéma précis des états d'énergie internes du noyau. Quand on examine les



5. LES NOYAUX DÉTECTÉS DANS L'EXPÉRIENCE réalisée par l'auteur et son équipe peuvent être représentés dans le plan de coordonnées $(A/Z, Z)$ où Z est le nombre de protons et A le nombre de nucléons. L'imprécision des résultats se traduit par les nuages de points de mesures, représentés en couleurs d'autant plus rouges que la fréquence d'apparition d'un noyau $(A/Z, Z)$ est grande (échelle représentée à droite). Un point complètement rouge signifie ainsi que plus de 1 000 ions du même type ont été produits au cours de l'expérience.