

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

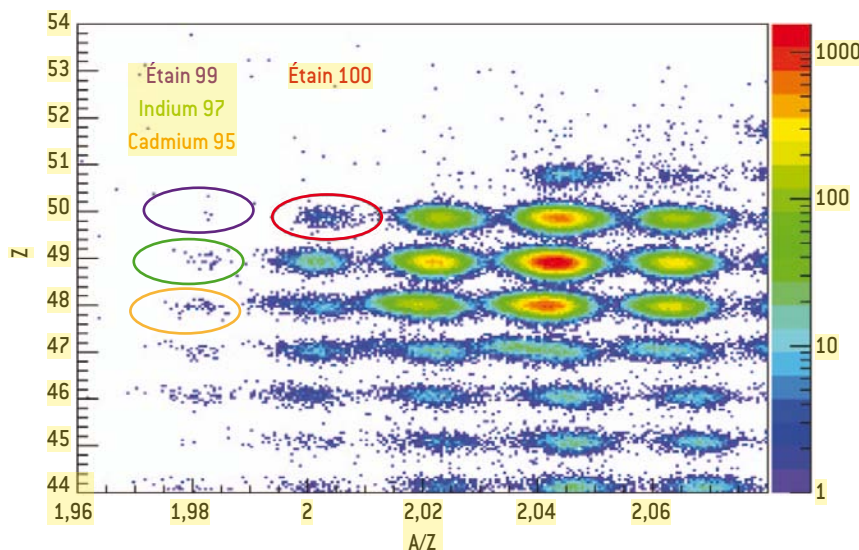
premiers mesurent la position horizontale et verticale du point où les noyaux pénètrent dans le détecteur. Les trois suivants constituent la zone d'arrêt ; ils enregistrent en trois dimensions la position où s'immobilise le noyau, et cela avec une précision de un millimètre dans les directions horizontale 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.

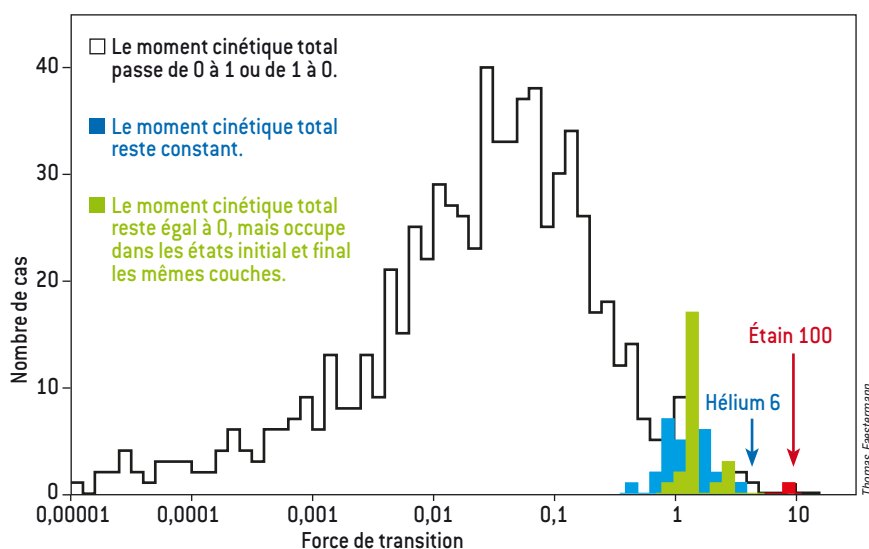
prédictions faites par le modèle en couches, on obtient des résultats plausibles. En tout cas, nous n'avons pas obtenu d'indications fortes que la désintégration bêta se passerait différemment du scénario théorique (voir la figure 2). Un aspect du modèle en couches était ainsi confirmé.

Nous avons aussi pu interpréter le spectre des énergies de désintégration. En comparant les spectres d'énergie des positrons avec des spectres calculés pour différentes énergies de désintégration, nous avons déterminé l'énergie de la transition de l'étain 100 à l'indium 100 excitée avec une précision de tout juste cinq pour cent. Connaissant la demi-vie et cette énergie, nous avons alors déduit la valeur de la force de transition de l'étain 100, soit 9,1. Cette force de transition est la plus élevée jamais mesurée et prédite dans une désintégration bêta! Pour comparaison, pour l'hélium 6, la force de transition n'est que de 4,7 (voir la figure 6).

Vers l'étude des niveaux excités

Qu'est-ce qui rend la décroissance bêta de l'étain 100 si forte? Pour le comprendre, il faut prendre un peu de champ. Le spin et le moment cinétique orbital d'un état nucléaire ne peuvent être mesurés indépendamment: c'est le moment cinétique total que l'on mesure. Or ce dernier ne résulte pas du seul remplissage de couches par des nucléons décrits par le modèle en couches, mais en principe plutôt d'un très grand nombre de configurations différentes. C'est là que le caractère doublement magique de l'étain 100 présente un fort atout: il réduit considérablement le nombre de configurations mises en jeu, ce qui rend le modèle en couches bien adapté. Les comparaisons entre expérience et théorie sont ainsi facilitées.

Les calculs correspondants se fondent sur les fonctions de probabilité utilisées en théorie quantique. Un noyau atomique peut se trouver simultanément dans plusieurs configurations, c'est-à-dire dans une « superposition d'états ». Dans un processus de désintégration, l'ensemble de ces configurations et leurs probabilités interviennent. Un calcul quantique récent indique que l'état fondamental de l'étain 100 est constitué à 82 pour cent d'une configuration à 10 protons dans la sous-couche $g_{9/2}$ et comportant une sous-couche $g_{7/2}$ complètement vide en neutrons.



6. LES VALEURS POSSIBLES DE LA FORCE DE TRANSITION de la désintégration bêta des noyaux atomiques sont représentées ci-dessus sur une échelle logarithmique, en regard des fréquences d'apparition correspondantes. On distingue des transitions « permises » (blanc, bleu) et « superpermises » (vert et rouge). Les transitions seulement « permises » sont caractérisées par des forces de transition deux à trois fois inférieures à celle de la désintégration bêta de l'étain 100, dont la plus fréquente est la valeur 9,1.

BIBLIOGRAPHIE

C. B. Hinke *et al.*, *Superaligned Gamow-Teller decay of the doubly magic nucleus Sn-100*, *Nature*, vol. 486, pp. 341-345, 2012.

D. Bazin, *Nuclear physics : symmetrical tin*, *Nature*, vol. 486, pp. 330-331, 2012.

N. D. Cook, *Models of the Atomic Nucleus*, Springer (2^e éd.), 2010.

Une des configurations restantes est par exemple celle où une paire de protons ou de neutrons est excitée, c'est-à-dire placée dans une couche d'énergie supérieure.

Entre-temps, presque toutes les données de l'année 2008 ont été analysées. Nous sommes aussi en phase de démarrage d'une expérience supplémentaire sur l'étain 100. Dans le cadre d'une collaboration internationale avec des équipes de France, d'Allemagne, du Japon, de Pologne et d'autres pays, nous avons l'intention d'effectuer cette année une expérience sur l'accélérateur RIBF de l'institut de recherche japonais RIKEN. Les ions accélérés n'y atteignent certes que la moitié de la vitesse possible au GSI, mais la très haute intensité des faisceaux d'ions compense largement cet inconvénient, de sorte que l'on espère dix fois plus de données.

Cela nous permettra non seulement d'améliorer la précision de notre expérience, mais peut-être aussi de réaliser de nouvelles découvertes. Par exemple, certains théoriciens prédisent qu'un certain état excité de l'étain 100 pourrait avoir une durée de vie suffisante pour ne se désintégrer qu'après un temps de vol de 100 milliardièmes de seconde. Nous ne pourrions confirmer cette prédiction qu'après avoir obtenu plus d'une centaine de mesures, ce qui inaugurerait l'étude des états excités de l'étain 100. ■