

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.

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

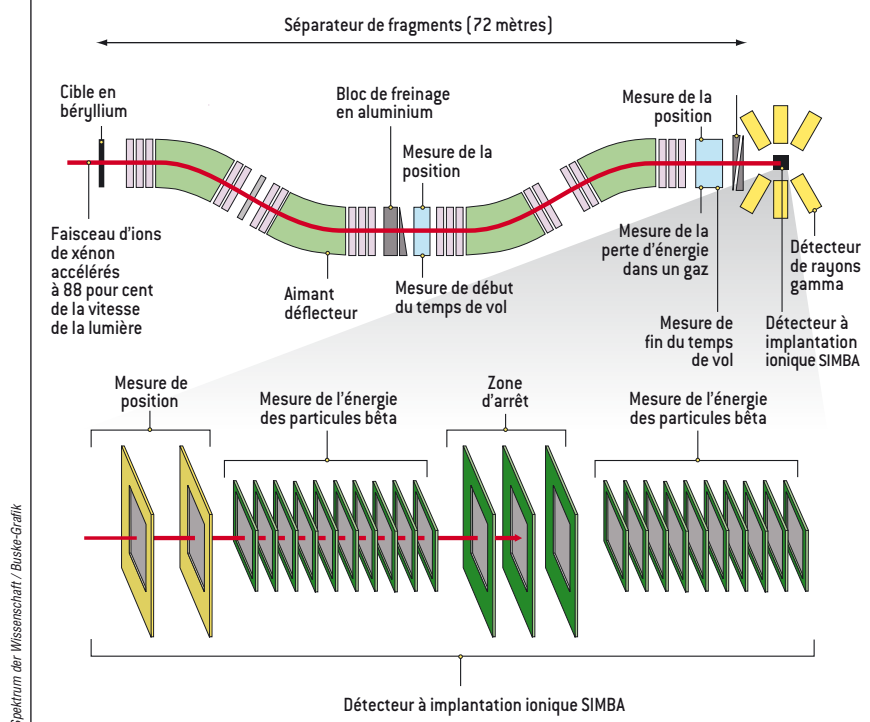
au sein du détecteur à implantation SIMBA, composé d'un empilement de 25 détecteurs au silicium. Dans les deux premiers sont déterminées les coordonnées dans les directions horizontales. Les ions s'arrêtent ensuite dans l'un des trois détecteurs de la zone dite d'arrêt, où leur position est à nouveau 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.

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



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

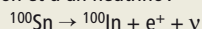
de l'énergie emportée par les rayonnements gamma émis par l'indium 100 en se désexcitant. Les résultats ainsi obtenus recoupaient les nôtres, et la précision de l'expérience était également à peu près comparable. Une nouvelle valeur de la demi-vie (temps au bout duquel la moitié des noyaux initiaux se 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