

peut fonctionner en mode conscient et en mode inconscient, alors que l'inconscient de Freud a ses propres règles, distinctes de celles qui contrôlent l'activité consciente.

En fait, en étudiant la psychologie du désir, les chercheurs ont découvert que la façon d'atteindre un objectif est à peu près la même, que nous agissions de façon consciente ou non consciente. Dans leurs travaux, Mathias Pessiglione et Chris Frith, lorsqu'ils étaient au Centre Wellcom Trust d'imagerie cérébrale de l'Université de Londres, avaient demandé à des sujets de repousser un levier aussi vite que possible quand on le leur demandait. Avant chaque essai, les sujets recevaient un indice soit conscient soit subliminal sur la récompense qu'ils obtiendraient. Ils ont montré que les sujets réagissaient de la même façon, que l'indice ait été perçu consciemment ou non, et qu'ils poussaient plus vite sur le levier quand la récompense était importante. L'imagerie cérébrale a révélé que les aires de la motivation s'activaient au cours de tous les tests, que la récompense soit annoncée de façon consciente ou subliminale.

Cette étude, entre autres, montre qu'un stimulus perçu inconsciemment suffit à inciter une personne à atteindre un but, alors même qu'elle n'en a pas conscience. Nul besoin de délibération consciente ou de libre arbitre pour agir !

Notre inconscient nous aide non seulement à choisir, mais aussi à trouver la

L'INCONSCIENT DICTE SA LOI, que nous soyons éveillés ou engloutis dans les profondeurs d'un rêve.

motivation pour agir. Les psychologues ont constaté depuis longtemps que les personnes à qui, dans une expérience, on attribue une position dominante adoptent des comportements égoïstes et corrompus, faisant passer leur intérêt personnel avant tout. Le besoin de dominer les autres dans un groupe se révèle souvent par des indices dont nous n'avons pas conscience. Dans une étude, des participants pris au hasard à qui l'on demandait de s'asseoir à la place du professeur faisaient peu de cas de ce que les autres pensaient d'eux et hésitaient

moins à exprimer des sentiments racistes et antisociaux que les participants assis dans la salle, en face du bureau.

Heureusement, de nombreuses personnes recherchent le bien-être d'autrui ; c'est le cas des parents qui placent l'intérêt de leurs enfants avant le leur. Ces individus préoccupés par autrui le resteraient-ils s'ils venaient à occuper une position de pouvoir ? Diverses études ont montré que ces individus conservent alors des attitudes altruistes, sans avoir conscience de leurs motivations. Ils sont aussi plus soucieux de ce que les autres pensent d'eux et sont moins sensibles aux stéréotypes racistes.

Freud a expliqué avec force détails comment nos désirs insatisfaits s'expriment par les images et les histoires qui peuplent nos rêves. La recherche récente explique de façon plus pragmatique comment notre inconscient contrôle la façon dont nous interagissons avec notre patron, nos parents, nos conjoints, nos enfants. Il dicte sa loi à chaque instant de notre vie, que nous soyons éveillés ou engloutis dans les profondeurs d'un rêve. ■

L'information scientifique de référence maintenant sur tablette et smartphone !

Avec l'application « Pour la Science », retrouvez dès leur sortie le mensuel *Pour la Science* à 5,49 € et son hors-série trimestriel *Dossier Pour la Science* à 5,99 € en version numérique optimisée pour tablette : lecture intuitive, sommaire interactif, contenus enrichis, feuilletage hors connexion, etc.

Découvrez aussi l'application « Pour la Science ».

Disponible sur
App Store



Flashez ce QR code avec votre mobile ou votre tablette pour télécharger immédiatement l'application.

Disponible sur
Google play



Téléchargez gratuitement
l'application sur App Store et Google Play.
Le 1^{er} numéro de *Pour la Science* est offert !



La double magie de l'étain 100

Thomas Faestermann

La structure particulière du noyau atomique de l'étain 100 en fait un candidat précieux pour tester la théorie nucléaire. Des expériences récentes ont permis de produire ce noyau et de mesurer certaines de ses propriétés.

Origine de l'Univers, structure de l'espace-temps, boson de Higgs... Les annonces médiatiques créent l'impression que les physiciens ne rêvent que de grandes questions portant sur les fondements de l'Univers, tandis que les domaines moins en vue seraient désormais bien connus et bien compris. S'agissant des atomes, on apprend ainsi dès le lycée que les noyaux atomiques sont formés de protons et de neutrons, lesquels sont eux-mêmes composés de quarks collés par des particules nommées gluons ; puis l'on entend que les chercheurs s'interrogent désormais sur la structure des quarks...

Tout cela n'est qu'apparence, car des questions de fond continuent à se poser dans les domaines moins médiatiques aussi ! Ainsi en est-il de l'étude des noyaux atomiques. Si l'on sait décrire aujourd'hui de façon détaillée les noyaux légers, nous sommes encore loin d'un modèle efficace pour la compréhension des noyaux lourds. Comme nous allons le voir, l'étude des noyaux dits magiques, voire doublement magiques, tel que l'étain 100 (voir la figure 1), est un passage obligé pour atteindre cet

L'ESSENTIEL

- Les physiciens cherchent à comprendre le noyau atomique à l'aide de modèles, en particulier le « modèle en couches ».
- Ce modèle décrit bien les noyaux légers, mais il est difficile à appliquer aux noyaux lourds en raison de leur complexité.
- Certains noyaux dits magiques font exception et sont donc intéressants à étudier expérimentalement.
- C'est le cas de l'étain 100, noyau magique à la fois par son nombre de protons et par son nombre de neutrons, et qui a fait l'objet de plusieurs expériences récentes.

objectif. Plusieurs résultats ont ainsi été obtenus sur l'étain 100 lors d'expériences récentes, menées en particulier à Darmstadt, en Allemagne.

En 1932, le Britannique James Chadwick découvrait qu'un troisième composant atomique s'ajoute à l'électron et au proton : le neutron. Depuis, la même question demeure : comment les nucléons, c'est-à-dire les protons et les neutrons, se répartissent-ils à l'intérieur du noyau ? Pour y répondre, le physicien russo-américain George Gamow développa à Léninegrad, dans les années 1930, l'idée de base du « modèle de la goutte liquide ». Le noyau atomique y est comparé à une goutte de liquide qui, comme une goutte d'eau, peut se déformer, mais en gardant un volume constant. De même que les molécules d'eau sont liées entre elles par des forces agissant localement et à l'échelle microscopique, chaque proton et chaque neutron exerce une très forte attraction sur ses voisins immédiats : c'est la force (ou interaction) nucléaire. La portée de cette force est si petite (de l'ordre du femtomètre, soit 10^{-15} mètre) qu'elle n'agit plus sur les nucléons plus lointains que les voisins immédiats.

Ce concept une fois posé, Gamow devait expliquer pourquoi le noyau ne se disloque pas sous l'effet de la répulsion électrostatique entre les protons, de charge positive. Cette répulsion est plus faible que la force nucléaire, mais sa portée est bien supérieure. Il détermina que pour un noyau contenant plus de 100 protons, la répulsion électrostatique devrait prendre le dessus sur la force nucléaire, et le noyau serait alors instable. Cela correspond à ce qui est observé dans la nature, où le noyau naturel le plus lourd, celui d'uranium, ne contient que 92 protons. Les atomes les plus massifs créés par les physiciens ont jusqu'à 118 protons, mais ils se désintègrent en une fraction de seconde.

Le modèle nucléaire de la goutte liquide prédit beaucoup de résultats de mesure,

mais n'explique pas tout. En particulier, il n'explique pas les nombres magiques.

Ces nombres ont été découverts dans les années 1940, quand on a remarqué que les noyaux de numéros atomiques $Z = 2, 8, 20, 28, 50$ et 82 (le numéro atomique Z désigne le nombre de protons du noyau) sont particulièrement stables. De même, les noyaux contenant les mêmes nombres de neutrons, ainsi que 126 neutrons, ont aussi une stabilité remarquable. Ces nombres, comme les noyaux qu'ils caractérisent, ont été qualifiés de magiques. Précisons que si les noyaux magiques sont stables vis-à-vis de l'interaction nucléaire (plus précisément, l'interaction fondamentale dite forte), ils peuvent néanmoins, dans nombre de cas, subir une désintégration

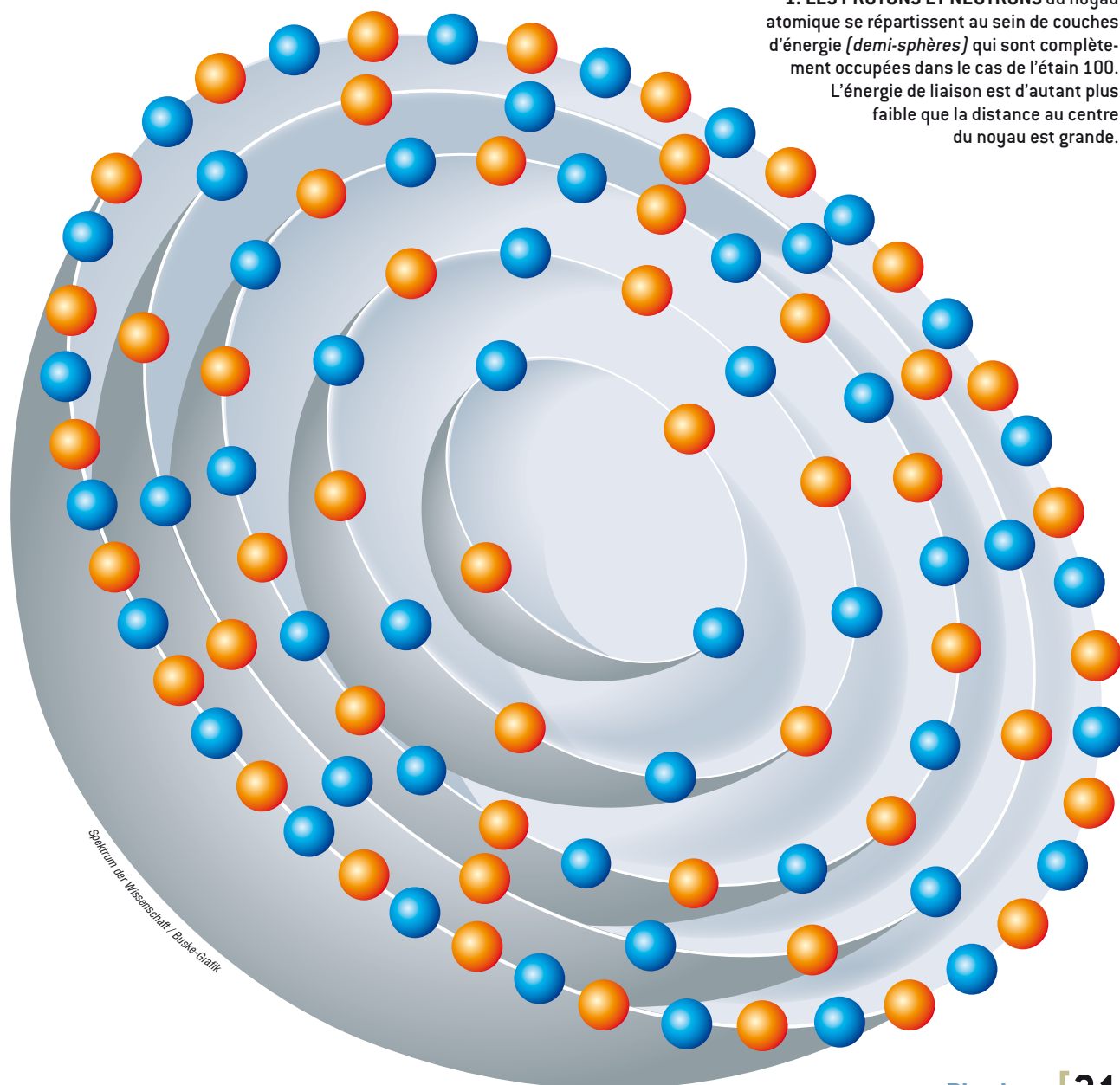
bêta (due à l'interaction fondamentale dite faible).

Les noyaux « doublement magiques » sont ceux qui possèdent à la fois un nombre magique de protons et un nombre magique de neutrons. C'est le cas, par exemple, du plomb 208 avec ses 82 protons et ses 126 neutrons, ou encore de l'étain 100 avec ses 50 protons et ses 50 neutrons.

Ces constatations ont rappelé aux physiciens qu'il existe un phénomène comparable au sein du cortège électronique de l'atome. Dans ce cas, ce sont les nombres d'électrons 2, 8, 18, 36, 54, et 86 qui rendent les nuages électroniques stables; les atomes correspondants sont très peu réactifs chimiquement. Dans ces atomes – ceux des gaz rares – les couches électroniques sont toutes

1. LES PROTONS ET NEUTRONS du noyau atomique se répartissent au sein de couches d'énergie (*demi-sphères*) qui sont complètement occupées dans le cas de l'étain 100.

L'énergie de liaison est d'autant plus faible que la distance au centre du noyau est grande.



Spectrum der Wissenschaft / Buske-Griff

complètes (elles contiennent le nombre maximal d'électrons), ce qui se traduit par le fait que leur arracher un électron est particulièrement coûteux en énergie.

Des couches de nucléons saturées

D'où l'idée du modèle en couches : les nucléons aussi se répartissent sur des couches, différentes suivant qu'elles contiennent des protons ou des neutrons. Comme les couches électroniques, les couches de protons ou de neutrons ne peuvent accueillir qu'un nombre limité de particules et correspondent à une certaine valeur de l'énergie de liaison des nucléons au noyau, cette énergie diminuant avec la distance au centre du noyau.

Quand le noyau atomique se trouve dans son état fondamental, c'est-à-dire

L'AUTEUR



Thomas FAESTERMANN est physicien nucléaire au laboratoire Maier-Leibnitz de l'Université de Munich, en Allemagne.

dans son niveau d'énergie le plus bas, les couches sont occupées depuis l'intérieur vers l'extérieur, les nucléons se trouvant dans les couches plus centrales étant plus fortement liés que ceux des couches périphériques.

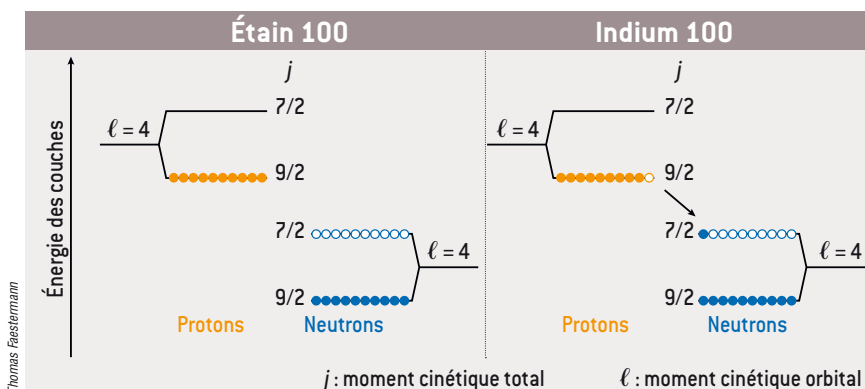
L'analogie entre couches électroniques et couches nucléoniques a toutefois ses limites. Tout d'abord, au contraire des forces électromagnétiques, la force nucléaire ne s'exerce qu'à très courte portée. Ensuite, dans le cas du nuage électronique, tout se passe comme si les électrons subissaient l'attraction d'une charge ponctuelle (le noyau, chargé positivement) située au centre de l'atome ; c'est loin d'être le cas au sein du noyau, puisque les nucléons subissent la force qu'ils engendrent eux-mêmes. Enfin, le « nuage nucléonique » contient deux types différents de particules.

Du reste, la seule hypothèse de couches électroniques ou nucléoniques ne suffit pas à expliquer les nombres magiques. Dans le cas du modèle en couches du noyau, les nombres magiques ont été expliqués indépendamment dans les années 1948 et 1949 par Maria Goeppert, de l'Université de Chicago, et par l'équipe de Hans Jensen à l'Université de Heidelberg. Leur solution du problème, pour laquelle ils reçurent conjointement le prix Nobel en 1963, découle du calcul du moment cinétique total des nucléons.

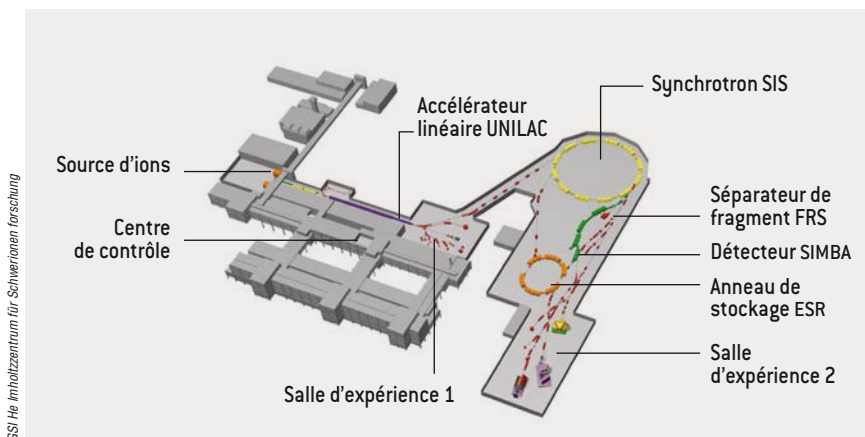
Niveaux d'énergie et moment cinétique

Cette grandeur, qui mesure la quantité de mouvement rotationnel, est en effet la somme du spin du nucléon (son moment cinétique intrinsèque, qui est une propriété exclusivement quantique) et de son moment cinétique orbital (dû à sa rotation autour du centre du noyau). Les physiciens décrivent les interactions entre ces deux types de moment cinétique en parlant de « couplage spin-orbite ».

Traditionnellement, on note s le spin et l le moment cinétique orbital. Les lois de la physique quantique imposent d'abord que, en projection sur un axe, l et s peuvent être soit de mêmes sens (on les dit alors parallèles), soit de sens opposés (on les dit alors antiparallèles) ; elles imposent ensuite que leur résultante peut varier par sauts de une unité entre $l - s$ et $l + s$, où l ne peut prendre que des valeurs entières (0, 1, 2, 3,...). Comme le spin s du nucléon (proton ou neutron) vaut $1/2$, son moment



2. CHAQUE COUCHE DE NUCLÉONS se caractérise par l'énergie, le moment cinétique orbital l et le spin s . Qu'il s'agisse de neutrons ou de protons, les couches les plus extérieures du noyau d'étain 100 sont complètement remplies et caractérisées par $l = 4$ et $s = 1/2$, avec un spin parallèle au moment cinétique orbital. Le moment cinétique total j vaut donc $9/2$. Lors de la désintégration bêta de l'étain 100, l'un des protons se transforme en neutron, ce qui donne un noyau d'indium 100. Le nouveau neutron vient occuper la couche neutronique située juste au-dessus de la dernière couche saturée ; pendant cette transition, son spin s'est inversé.



3. LE GSI, Centre de recherche sur les ions lourds de Darmstadt, en Allemagne, est un grand instrument de recherche équipé de l'accélérateur linéaire UNILAC et du synchrotron SIS.

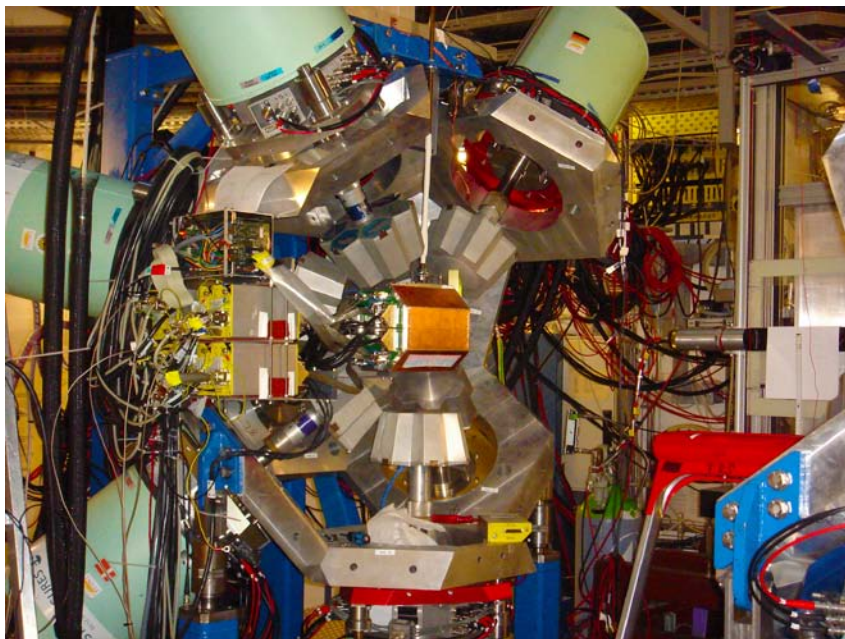
cinétique total, noté j , est égal soit à $l - 1/2$, soit à $l + 1/2$ (pour l fixé).

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

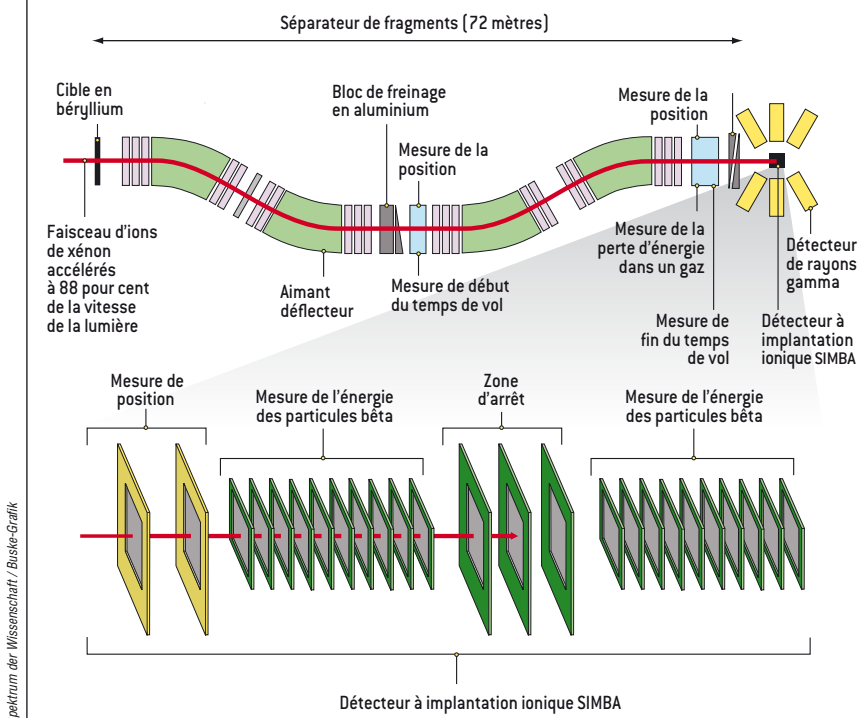
Pour étudier l'étain 100, on commence par accélérer des ions de xénon à 16 pour cent de la vitesse de la lumière, avec l'accélérateur UNILAC. Ces ions sont ensuite introduits dans le synchrotron SIS, qui porte leur vitesse à 88 pour cent de celle de la lumière. Une fois sortis de SIS, les ions de xénon 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.



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 mégaelectronvolts –, 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

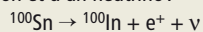
de l'énergie emportée par les rayonnements gamma émis par l'indium 100 en se déséxcitant. Les résultats ainsi obtenus recoupaient les nôtres, et la précision de l'expérience était également à peu près comparable. Une nouvelle valeur de la demi-vie (temps au bout duquel la moitié des noyaux initiaux se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

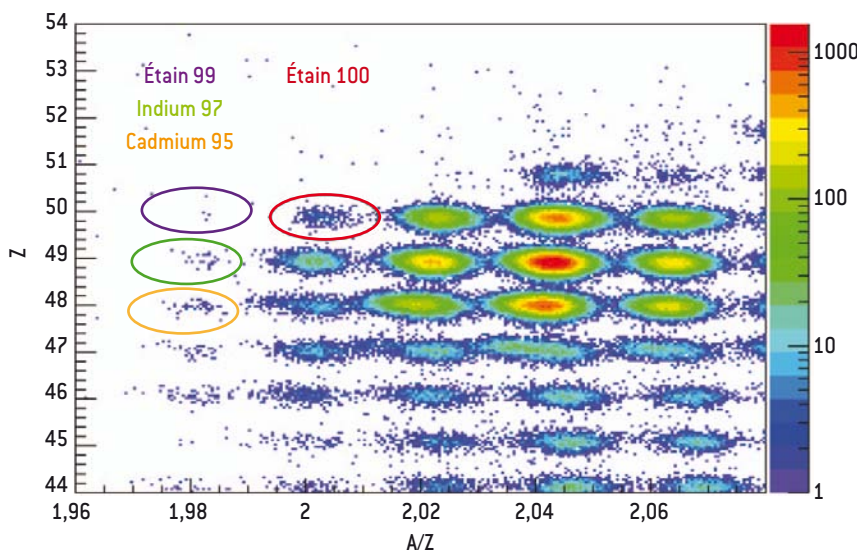
Que faire s'agissant des particules issues de la désintégration bêta ? Nous avons considéré que la présence de l'une d'elles au voisinage de la position d'arrêt suffit pour considérer qu'elle provient, avec une haute probabilité, de la désintégration du noyau venant de s'arrêter. Leur

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.

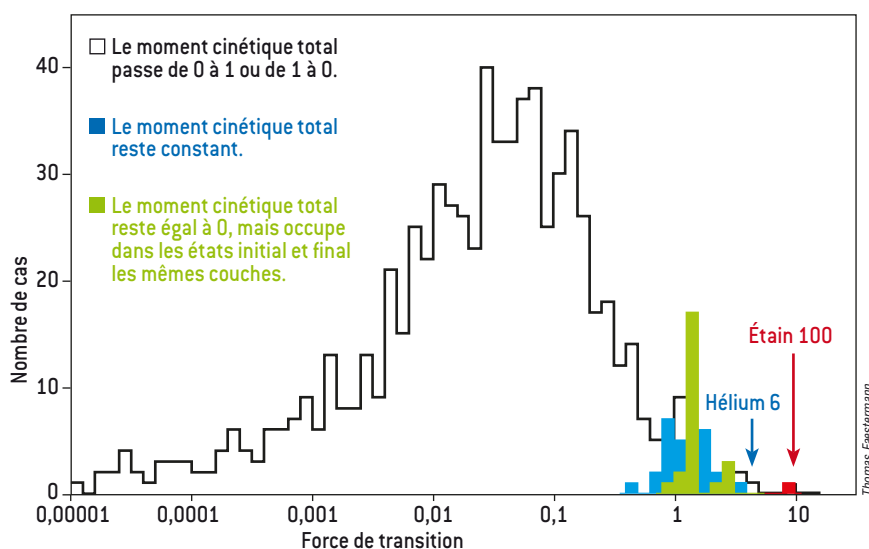
prédictions faites par le modèle en couches, on obtient des résultats plausibles. En tout cas, nous n'avons pas obtenu d'indications fortes que la désintégration bêta se passerait différemment du scénario théorique (voir la figure 2). Un aspect du modèle en couches était ainsi confirmé.

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. ■

Aux origines des villes celtes

Depuis un siècle, les découvertes des archéologues qui étudient la civilisation celtique en France et en Tchéquie se rejoignent. Cette rencontre a récemment révélé comment s'est transformé l'habitat urbain chez les anciens Celtes.

Vladimir Salač
et Olivier Buchsenschutz

En 1899, à la suite d'un voyage en Bohême et à Vienne, nous avions nous-mêmes, d'accord avec M. Pič, insisté particulièrement sur l'unité complète de civilisation – phénomène vraiment inattendu – que présentent les deux stations de Stradonitz et du Mont Beuvray, ancienne Bibracte, capitale des Éduens.

*Le Hradischt de Stradonitz en Bohême,
Joseph Déchelette, 1906*

À l'issue de la bataille de Bibracte (58 avant notre ère), César renvoie chez eux les Helvètes, mais il lui reste à disposer de 20 000 Boïens venus, avec femmes et enfants, s'associer à la tentative de migration helvète. Ces Boïens, qu'il assignera à résidence dans ce qui est devenu aujourd'hui la région de Sancerre, appartiennent à l'un des plus importants peuples celtiques d'alors. On en retrouve les traces aujourd'hui non seulement en France, en Italie, en Hongrie, en Slovaquie, en Autriche, en Allemagne, mais surtout en Tchéquie, où il a donné son nom à une région : la Bohême (qui provient de *Boiohaemum* signifiant « pays des Boïens »).

Or depuis plus d'un siècle, les archéologues tchèques et français font les mêmes constatations. En le découvrant, ils ont fini par conclure de conserve que ces deux régions du monde celtique, pourtant éloignées, ont évolué de la même façon. Nous allons raconter ici comment la poursuite de leur dialogue scientifique jusqu'à aujourd'hui, malgré les aléas de l'histoire européenne, a révélé l'existence chez les Celtes du Second âge du

1. CE VILLAGE D'ARTISANS CELTES, restitué par un artiste sur la base de fouilles menées en Tchéquie, est caractéristique du II^e siècle avant notre ère. Plusieurs agglomérations similaires ont été trouvées en France.