

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,

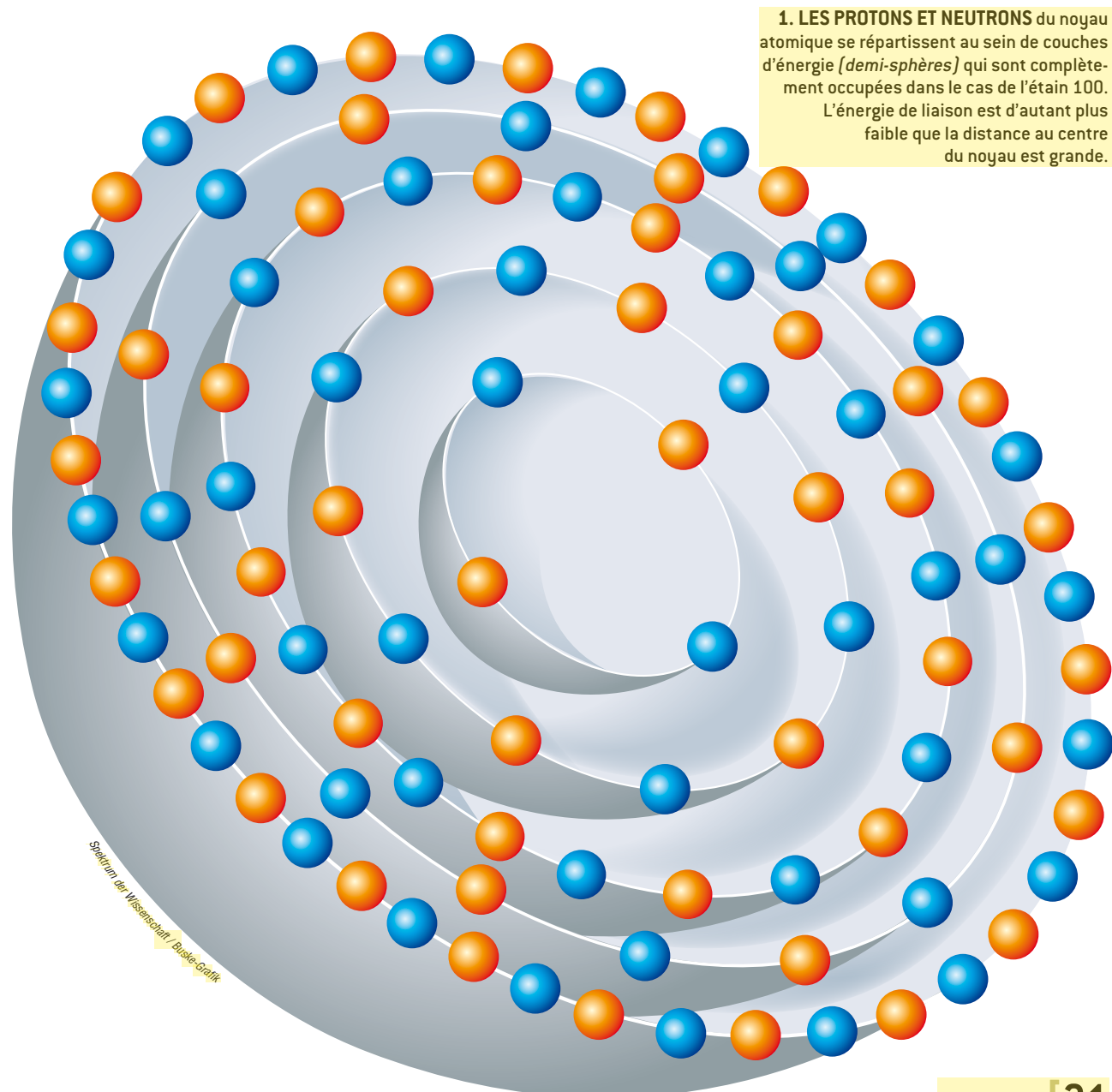
mais n'explique pas tout. En particulier, il n'explique pas les nombres magiques.

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.

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



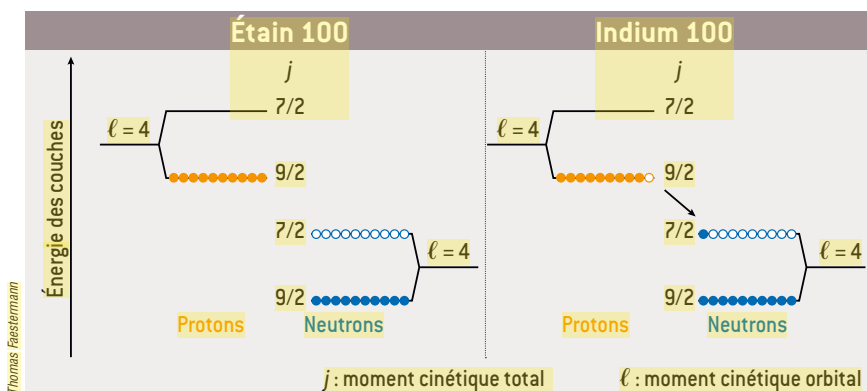
Thomas FAESTERMANN est physicien nucléaire au laboratoire Maier-Leibnitz

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.

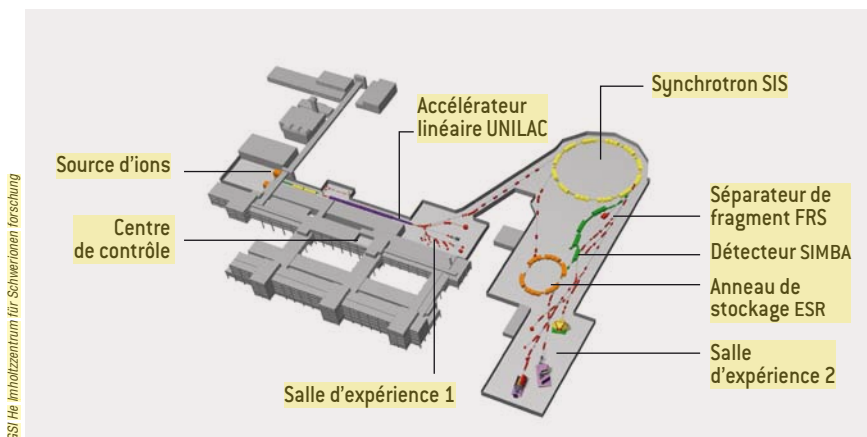


**2. CHAQUE COUCHE DE NUCLÉONS** se caractérise par l'énergie, le moment cinétique orbital  $l$  et le spin  $s$ . Qu'il s'agisse de neutrons ou de protons, les couches les plus extérieures du noyau d'étain 100 sont complètement remplies et caractérisées par  $l = 4$  et  $s = 1/2$ , avec un spin parallèle 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.

## 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



**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.

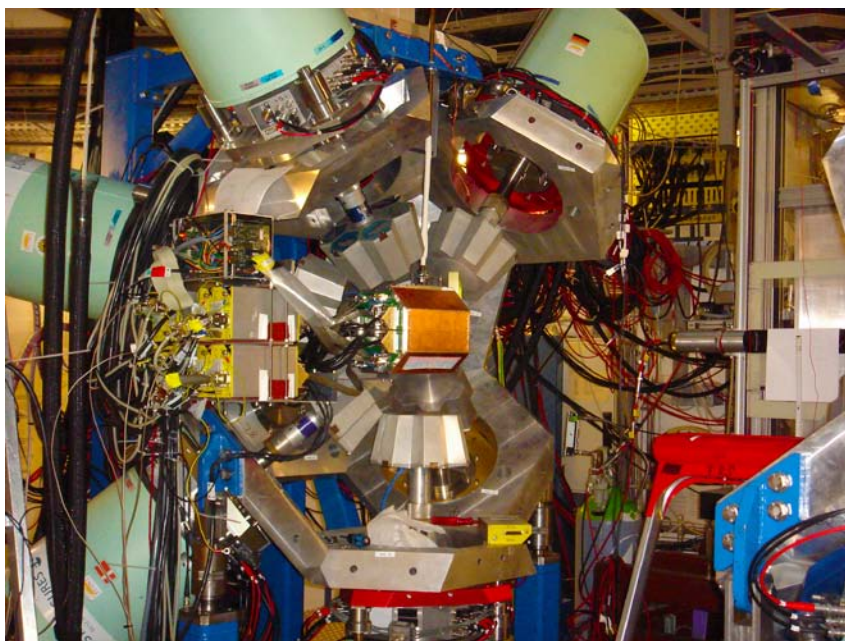
cinétique total, noté  $j$ , est égal soit à  $l - 1/2$ , soit à  $l + 1/2$  (pour  $l$  fixé).

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  $^A_Z\text{S}$ , 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.