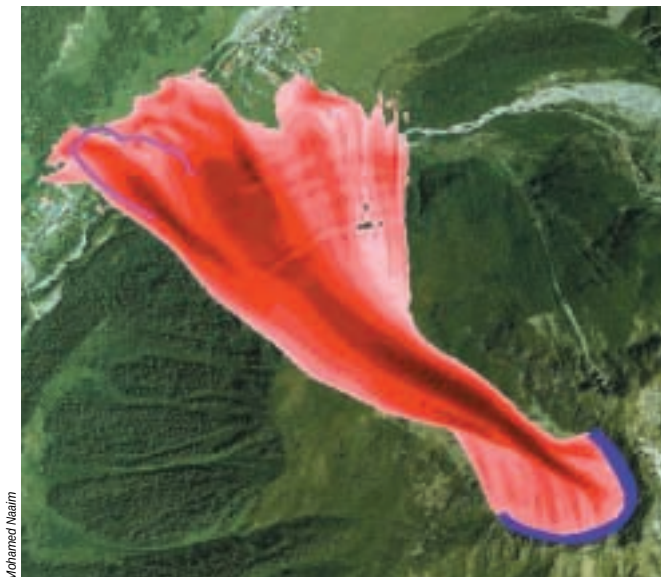
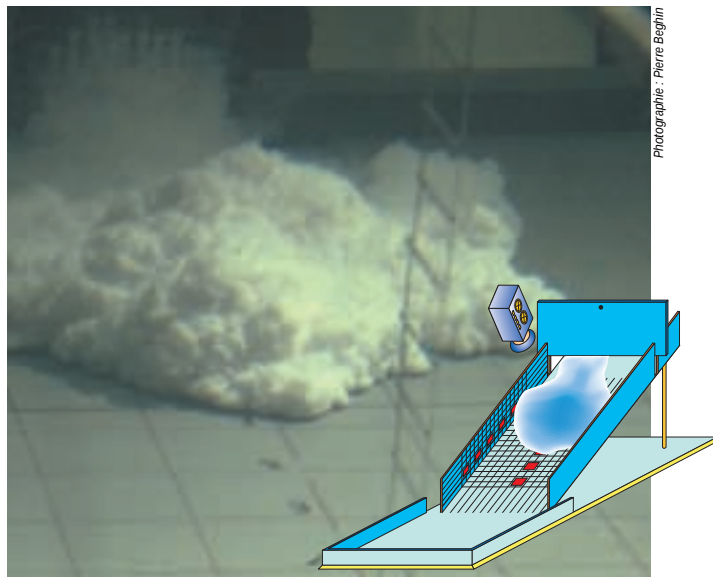




Mohamed Naaim

8. LA SIMULATION NUMÉRIQUE de l'avalanche de MontRoc, près de Chamonix, en Haute-Savoie, montre l'onde de pression (plus le rouge est foncé, plus la pression est forte) de la neige détachée de la zone de départ (en bleu, en bas à droite). L'écoulement dense, dont la zone d'arrêt, dans le village même, est marquée en violet, a suivi deux couloirs différents.



Photographie : Pierre Beghin

9. PAR DES EXPÉRIENCES EN LABORATOIRE, on mesure les paramètres des modèles numériques. Une masse de neige artificielle est libérée par une trappe sur un plan incliné muni de capteurs (en rouge sur le schéma) et filmé par une caméra. Dans un autre type d'expériences, les écoulements aérosols sont simulés par des suspensions de particules dans un bassin rempli d'eau (photographie).

exposés au flux de particules. Les sons des impacts des particules sont convertis en signaux électriques. Un filtrage élimine les basses fréquences dues au vent et les hautes fréquences parasites.

Des paramètres à la validation

Par ailleurs, nous étudions en laboratoire le comportement de matériaux modèles (poudre dérivée de la chaux, différents sables, billes de polychlorure de vinyle, sciure de bois) sur des plans inclinables équipés d'une caméra vidéo et de capteurs qui mesurent l'épaisseur de l'avalanche et les contraintes exercées sur le fond du canal lors de son passage.

Nous simulons également des écoulements aérosols dans des bassins d'eau où s'écoulent des suspensions de particules. Ainsi, l'écoulement est suffisamment lent pour être suivi avec précision (voir la figure 9). Les résultats des modèles numériques sont ensuite validés par comparaison avec les résultats des expériences en laboratoire et sur le terrain. Nos résultats numériques s'accordent avec les résultats expérimentaux, aussi bien pour les écoulements aérosols que pour les écoulements denses.

Enfin, nous validons nos modèles par des reconstitutions d'événements : il s'agit d'une justification globale des résultats par rapport à des données

d'enquêtes sur le terrain telles que les limites de l'avalanche, les dégâts, l'estimation de la zone de départ, l'estimation de l'épaisseur de neige initiale.

Par exemple, nous avons reconstitué l'avalanche du Bourgeat, en Savoie, et l'avalanche du Tour, à Chamonix (voir la figure 8), qui ont provoqué des dégâts importants dans des zones habitées. Nous avons, d'une part, relevé l'ensemble des informations de terrain laissées par l'avalanche et, d'autre part, étudié les conditions météorologiques qui ont produit cet événement. Le manteau neigeux était composé uniquement de la neige fraîche tombée durant les 24 heures précédentes. Le modèle a reproduit précisément le champ de pression dans la zone des dégâts. Ce protocole a été appliqué à cinq couloirs différents, dont les géométries et les topographies sont des archétypes de couloirs d'avalanches. Pour chacun, la comparaison des relevés sur le terrain et des résultats du modèle numérique a permis de reproduire les limites des cinq avalanches observées. Pour les couloirs étudiés, la simulation permet de

modifier des paramètres et de simuler les conséquences d'événements plus catastrophiques que ceux observés. Pour les couloirs mal connus, on procède par analogie avec des couloirs bien étudiés.

Ainsi, les collectivités seront en mesure d'optimiser le zonage d'une région, c'est-à-dire d'identifier les domaines où les implantations d'habitations et d'équipements sont déconseillées, risquées ou sans danger.

En outre, nous espérons créer un environnement commun européen pour le zonage assisté par ordinateur, alliant la modélisation numérique, les capacités des systèmes d'informations géographiques et les données du terrain. Les modèles présentés ne rendent pas encore compte de toute la complexité des avalanches, mais ils sont suffisants pour établir les scénarios possibles le long d'un couloir donné. Ajoutés à d'autres sources d'informations, notamment les données historiques et l'interprétation de photos aériennes, les modèles informatiques participent déjà à la prévention des avalanches.

Mohamed NAAIM est chargé de recherche au CEMAGREF, à Grenoble. Florence BOUVET-NAAIM est ingénieur de recherche au CEMAGREF. Lionel VIDAL est ingénieur à la Société Transmontagne.

F. BOUVET-NAAIM, M. PRAT, J.-A. CALGARO et J. RAOUL, *La neige : recherche et*

réglementation, CEMAGREF et Presses de l'École nationale des Ponts et Chaussées.

M. NAAIM, F. BOUVET-NAAIM et H. MARTINEZ, *Numerical Simulation of Chifting Snow : Erosion and Deposition Models*, in *Annals of Glaciology*, n° 26, pp. 212-216, 1997.

À la recherche de l'îlot superlourd

IOURI OGANESSIAN • VLADIMIR UTYONKOV • KENTON MOODY

La synthèse de l'élément 114 a confirmé des prévisions théoriques vieilles de plusieurs décennies : un îlot de stabilité nucléaire existe au milieu de la mer des noyaux superlourds à courte durée de vie.

Au printemps 1940, la synthèse du neptunium marque le début d'une fascinante odyssée dans des eaux inexplorées. Dans l'océan des noyaux lourds, les noyaux qui ont plus de protons que l'uranium (soit plus de 92 protons) ont des propriétés remarquables. En raison de leur nombre élevé d'électrons, ces éléments «transuraniens» ont fourni aux chimistes des renseignements précieux sur les liaisons chimiques et sur l'arrangement des électrons dans les atomes. Ces éléments sont également utilisés dans des techniques variées, des armes nucléaires aux détecteurs de fumée.

La quête des éléments transuraniens a ainsi abouti à la synthèse de 23 éléments. Parmi ceux-ci, seuls les deux plus légers (le neptunium et le plutonium) existent à l'état naturel. La création récente de l'élément 114 a mis fin à une traversée particulièrement difficile, et les physiciens ont touché terre après une navigation périlleuse dans un océan d'instabilité, entre les éléments à plus de 106 protons : en bombardant des noyaux lourds à l'aide de faisceaux d'ions de noyaux plus légers, les physiciens fabriquent des noyaux superlourds si instables qu'ils se divisent presque aussitôt, une fraction de seconde après leur création ; alors qu'ils approchaient du nombre «magique» de 114, les expérimentateurs ont enfin vu apparaître un îlot de stabilité, où tout un ensemble d'éléments encore plus lourds font preuve d'une stabilité et d'une longévité étonnantes.

Les physiciens nucléaires entrevoient l'îlot de stabilité dès 1966. Toutefois, telle la cité légendaire d'El-

dorado, cet îlot de stabilité semble être inaccessible à jamais. Contrairement à l'Eldorado, la localisation de l'îlot n'était pas secrète : on a calculé que son point le plus stable était un isotope de l'élément 114 comprenant 184 neutrons. Ce point central était entouré d'éléments un peu moins stables, dont les nombres de protons étaient compris entre 109 et 115. Les physiciens avaient ainsi une carte qui montre où se rendre, mais le problème est de savoir comment s'y rendre et comment savoir quand on sera au but.

Les premières synthèses d'éléments lourds datent de 1934. On bombardait alors des noyaux d'éléments lourds par des faisceaux de neutrons. Chaque neutron capté par le noyau cible subit une désintégration bêta : il se transforme en un proton et un électron. Le noyau résultant possède un proton de plus que le noyau cible initial. Autrement dit, le numéro atomique (le nombre de protons du noyau) de l'élément créé augmente d'une unité par rapport à celui de l'élément cible, ce qui change la nature de l'élément ; le nombre de neutrons, lui, détermine la stabilité de l'«isotope» formé.

Au milieu des années 1950, les physiciens ont ainsi synthétisé les éléments 93 (le neptunium), 94 (le plutonium), 99 et 100. À la même époque, ils ont créé les éléments 95, 96, 97, 98 et 101 en irradiant des noyaux lourds avec des faisceaux de particules alpha, c'est-à-dire des noyaux d'hélium 4, constitué de deux protons et de deux neutrons. Par cette méthode, on augmente le numéro atomique de deux unités.



La mise au point des accélérateurs de particules permet ensuite aux physiciens de focaliser des jets intenses d'ions légers, comme le bore (de numéro atomique 5) sur les noyaux d'éléments dont les numéros atomiques sont compris entre 94 et 98, afin de les faire fusionner. La fusion ne s'opère que si la collision est suffisamment forte pour surmonter la répulsion électrostatique entre les noyaux, chargés positivement. Comme on doit donner beaucoup d'énergie aux projectiles, le noyau résultant est très chaud. C'est un inconvénient, car le nouvel élément risque alors de se désintégrer avant même d'être sorti de la cible, plutôt que d'aboutir à un état stable. Grâce à cette technique, dite de «fusion chaude», les physiciens

créent les éléments 102 à 106 entre 1958 et 1974. Au-delà, la tendance à fissionner empêche la synthèse de nouveaux éléments.

Du chaud au froid

En 1974, à l'Institut de recherches nucléaires de Dubna (près de Moscou), l'un de nous (I. Oganessian) découvre qu'un faisceau d'ions plus lourds envoyé sur des noyaux plus légers que les transuraniens engendre des noyaux dont l'énergie d'excitation est inférieure. Ainsi, ces noyaux restent intacts plus longtemps. La recherche à l'aide de cette technique de «fusion froide» est mise en œuvre l'année suivante après l'ouverture de l'accélérateur UNILAC (*Universal Linear Accelerator*) à l'Institut de recherche sur les ions lourds (GSI), à Darmstadt (cette fusion froide n'a rien à voir avec celle qui prétendait récupérer l'énergie nucléaire par la synthèse de l'eau). L'UNILAC est l'un des premiers à accélérer des ions très lourds à grande énergie. Malheureusement, au cours des expériences, très

peu de noyaux du nouvel élément recherché sont créés, et les noyaux-fils, qui résultent de la désintégration du nouvel élément, se désintègrent si vite qu'ils doivent être détectés alors que la synthèse est encore en cours. Les méthodes de l'époque ne permettent pas la détection des éléments créés par cette technique, et plusieurs années s'écoulent sans qu'un nouvel élément ne soit identifié.

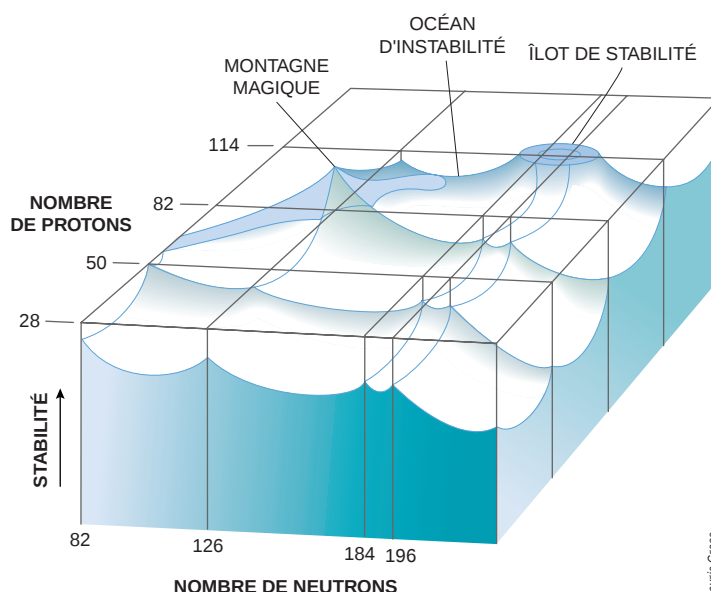
Au début des années 1980, une équipe de Darmstadt met au point une méthode sensible pour l'identification des produits de fusion. Grâce à elle, les physiciens allemands synthétisent et identifient les éléments 107, 108 et 109. C'est un exploit : l'accélérateur fonctionne pendant deux semaines d'affilée afin de créer un seul atome de l'élément 109. En ajustant l'intensité du faisceau d'ions et en augmentant la sensibilité des dispositifs de détection, la même équipe produit même l'élément 110 et 111, en 1994, et l'élément 112 en 1996. La période de l'élément 112 est de 240 microsecondes (la période, ou demi-vie, est le temps après lequel la moitié des noyaux d'un échantillon



sont désintégrés), et seuls deux de ces atomes sont produits en 25 jours d'expériences.

Depuis 1996, des équipes de recherche européennes, américaines et russes ont fabriqué six nouveaux éléments, avec des numéros atomiques allant jusqu'à 118. La synthèse la plus importante a été celle des isotopes de l'élément 114, parce qu'elle a établi l'existence de l'îlot de stabilité. Ce résultat a confirmé que certaines combinaisons de protons et de neutrons donnent des noyaux particulièrement cohésifs, des noyaux «magiques», tout comme les électrons réduisent l'instabilité chimique des atomes quand ils forment des couches complètes.

Selon le modèle nucléaire en couche, établi en 1948, plusieurs noyaux



1. L'Océan des noyaux lourds contient de nombreux éléments instables. Le noyau atomique d'un élément contient un nombre fixe de protons, mais il existe différentes formes de cet élément, les isotopes, dont le nombre de neutrons et la stabilité diffèrent. Sur cette carte, se trouve une montagne magique : l'isotope particulièrement stable du plomb (élément à 82 protons) contenant 126 neutrons. Pour les noyaux à plus de 106 protons, beaucoup de ces isotopes sont relativement instables ; ils forment comme un «océan d'instabilité». Depuis 1966, les théoriciens ont prédit l'existence d'un îlot de stabilité, au centre duquel se trouverait un isotope à 184 neutrons de l'élément 114. Les expérimentateurs ont récemment accédé à cet îlot en créant un isotope à 175 neutrons de l'élément 114.

sont magiques. Par exemple le plomb est doublement magique, car ses 82 protons et ses 126 neutrons forment respectivement des couches complètes. En 1966, les physiciens avaient établi que le noyau doublement magique suivant aurait 114 protons et 184 neutrons, mais cette prévision contredisait la théorie alors dominante, selon laquelle la période de désintégration de ces éléments ainsi que leur stabilité, diminuait rapidement à mesure que la masse des noyaux augmenterait. La prévision de ces nombres magiques a engendré de nombreuses spéculations sur la présence d'un îlot de noyaux d'une longévité inhabituelle, perdu au milieu d'un océan de noyaux instables.



2. L'ÉQUIPE DE RECHERCHE de l'Institut de physique nucléaire de Dubna pose près de son installation expérimentale. Le séparateur à gaz est en haut à gauche de la photographie, et l'on voit dépasser

sur la droite les bras du dispositif de la cible. Deux des auteurs de cet article figurent sur ce cliché : V. Utyonkov et I. Oganessian (respectivement deuxième et quatrième en partant de la gauche).

Cet îlot était difficile d'accès, parce que ses noyaux ont plus de neutrons par proton que n'importe quel noyau stable connu. Pour les obtenir, nous avons choisi une réaction qui introduisait beaucoup de neutrons dans le noyau cible : il s'agissait d'irradier du plutonium 244 (l'isotope le plus lourd du plutonium, de numéro atomique 94) avec un faisceau intense d'ions de calcium 48, un isotope rare et particulièrement riche en neutrons du calcium (numéro atomique 20). Nous espérions ainsi obtenir par fusion un noyau composé de 114 protons et de 178 neutrons, très proche de la configuration doublement magique de 114 protons et de 184 neutrons.

Nous savions que si les noyaux de calcium 48 heurtaient ceux de plutonium 244 avec une énergie suffisante pour vaincre leur répulsion électrostatique mutuelle, les noyaux résultants seraient peu excités, de sorte que certains d'entre eux au moins ne fissionneraient pas : ces noyaux perdraient rapidement trois neutrons, et le noyau alors formé serait à une température inférieure au seuil de fission (plus un noyau est chaud, plus il a des chances de fissionner).

Se débarrasser des indésirables

Toutes les tentatives précédentes avaient échoué, car les rares noyaux produits, au cours d'expériences qui durent des semaines, sont perdus au milieu de milliers de milliards d'autres espèces nucléaires. Pour détecter ces noyaux lourds, nous avons dû centupler la sensibilité des détecteurs. Grâce à ces détecteurs modifiés, nous avons détecté les éléments nouvellement synthétisés avant leur désintégration. Le cyclotron à ions lourds de Dubna accélérail les ions de calcium 48 jusqu'au dixième de la vitesse de la lumière, puis il les projetait sur une cible composée de minces feuilles de titane recouvertes de plusieurs milligrammes de plutonium 244.

Comment séparer les produits de réaction qui nous intéressaient de la multitude de produits annexes de l'expérience ? Nous savions que le noyau superlourd créé se désintégrerait par radioactivité alpha : à chaque désintégration, le noyau devait perdre un noyau d'hélium 4, soit deux protons et deux neutrons. L'élément 114 devait se désintégrer en l'élément 112, puis

en élément 110, puis en élément 108, jusqu'à ce que, hors de l'îlot de stabilité, une fission spontanée apparaisse. Malheureusement, la désintégration alpha et la fission des autres noyaux également produits lors de l'expérience ressemblent à ceux de l'élément 114. Or, des milliards de ces noyaux indésirables sont synthétisés chaque seconde, alors que l'on prévoyait moins d'un atome de l'élément 114 produit par jour. Comment éviter les événements parasites ?

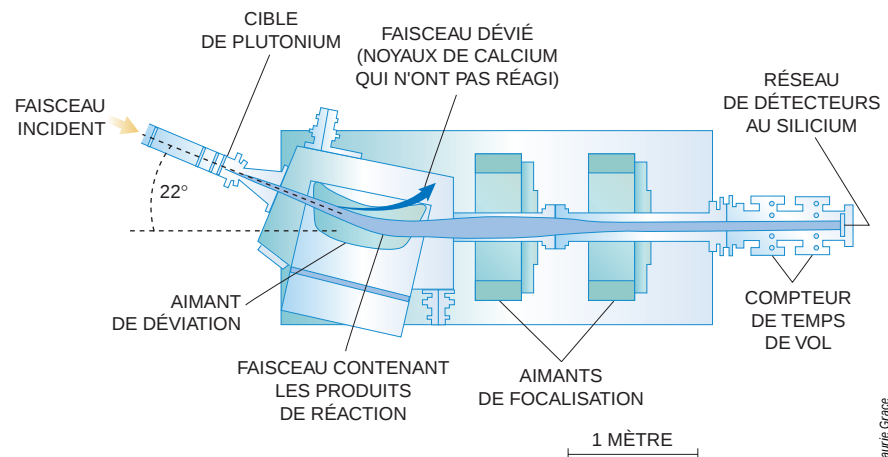
Les ingénieurs de Dubna ont conçu un séparateur rempli de gaz, qui laisse passer les produits que nous recherchons et détecte bien les désintégrations radioactives qui signalent leur présence, tout en éliminant les noyaux sans intérêt. Les produits de la fusion d'un noyau projectile et d'un noyau cible (mélange d'éléments 114 et d'autres produits non désirés) s'éloignent de la cible et entrent dans une chambre emplie d'hydrogène gazeux

à faible pression, dans l'entrefer d'un aimant. Les noyaux interagissent avec les atomes d'hydrogène gazeux, et ceux pour lesquels les électrons sont liés au noyau avec moins d'énergie que n'en fournit la collision ont tendance à se perdre. Le champ magnétique est ajusté de sorte que seuls les noyaux intéressants parviennent jusqu'au réseau de détection. Les noyaux de calcium 48 qui n'ont pas réagi avec la cible traversent rapidement l'hydrogène, mais ils sont si ionisés que le champ magnétique les dévie de la trajectoire qu'empruntent les particules recherchées. Le séparateur à gaz supprime également dans une grande mesure d'autres produits indésirables issus de collisions du noyau projectile sur le bord du noyau cible.

Les produits de réaction qui quittent le premier aimant sont alors focalisés magnétiquement vers un compteur de temps de vol, et ils finissent leur



Yuri Gripas, Gamma Liaison



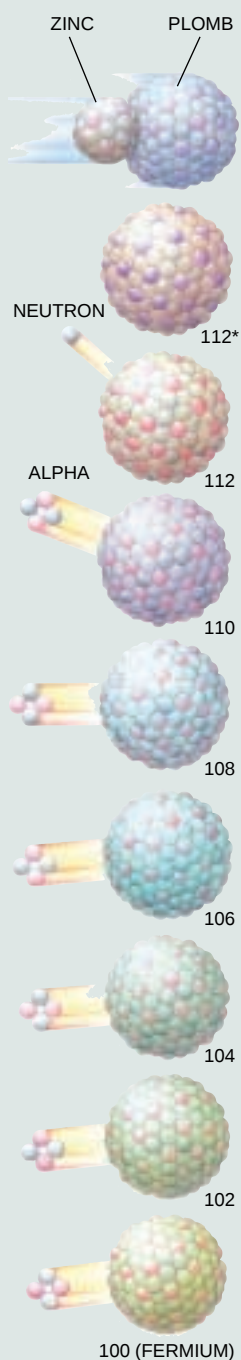
Laurie Grace

3. LE LABORATOIRE DE DUBNA (en haut) crée des faisceaux qui se déplacent de droite à gauche sur cette photographie. À gauche de la photographie se trouve le séparateur à gaz (schéma inférieur). Les faisceaux de produits de réaction provenant de la cible de plutonium sont déviés par un aimant. Les noyaux intéressants sont dirigés vers un ensemble de détecteurs en silicium. Les physiciens associent les informations sur les désintégrations nucléaires obtenues sur ces détecteurs et celles du compteur de temps de vol afin de déterminer quels isotopes ont été créés dans la cible.

1999, une année fertile en résultats et en interrogations

La synthèse d'éléments transuraniens, commencée en 1940, a procédé par sauts : quelques éléments découverts en une ou quelques années, puis plusieurs années consacrées à l'étude des propriétés de ces nouveaux éléments et à la mise au point de nouvelles méthodes de production ou d'identification. Ces méthodes servaient ensuite à la production des éléments suivants.

Entre 1981 et 1984, les physiciens nucléaires ont créé et observé les éléments 107 à 109, nommés bohrium (Bh), hassium (Hs) et meitnerium (Mt). Ce n'est que dix ans plus tard, entre 1994 et 1996, que les éléments 110 à 112 sont synthétisés. Jusque-là, la progression s'était faite pas à pas (mis à part l'élément 109 découvert avant l'élément 108) et il était vérifié que la chaîne de désintégration conduisait à un isotope déjà connu. Autrement dit, les physiciens mesuraient toutes les particules alpha et les durées de vie afférentes, et le noyau final était bien caractérisé : en remontant la chaîne des événements, on obtenait sans ambiguïté le nombre de protons et de neutrons du noyau initial implanté dans le détecteur.



Examinons, par exemple, la chaîne de désintégration de l'élément 112 produit par la fusion d'un noyau de zinc (70 nucléons, dont 30 protons) et d'un noyau de plomb (208 nucléons, dont 82 protons). L'élément 112 excité perd un neutron en 10^{-18} seconde, et c'est l'élément 112, avec 277 nucléons, qui s'implante dans le détecteur. La désintégration successive de cet élément, par émission d'une particule alpha, aboutit à un isotope du fermium dont les caractéristiques sont bien connues (voir la figure).

En 1999, la situation a changé à double titre : d'une part, on est passé directement à l'élément 114 (décrit dans cet article), puis à l'élément 118 (et au 116 par décroissance) ; d'autre part, la signature de l'attribution exacte n'a pu être obtenue. Dans le cas de l'élément 114, la chaîne de décroissance radioactive se fait bien par émission de particules alpha, mais elle se termine par une fission spontanée. Or, on n'identifie pas explicitement les produits de cette fission, mais uniquement l'énergie cinétique de ses deux fragments, qui augmente en moyenne avec le nombre de protons du noyau qui fissionne. Ici, elle est élevée, de sorte que l'on peut affirmer qu'elle vient d'un noyau très lourd. Toutefois, on ne peut préciser quel était le nombre de protons du noyau qui a fissionné et encore moins son nombre de neutrons.

Pour l'élément 118, le dernier noyau de la chaîne de désintégration n'est pas un isotope connu, et l'on ne peut remonter la chaîne des événements. Dans les deux cas, un important travail de vérification reste donc à faire.

Jean PETER,

Laboratoire de physique corpusculaire, Caen

course en s'implantant dans un détecteur de position. Le compteur de temps de vol permet de distinguer les impacts des produits qui traversent le séparateur et ceux des produits déjà arrivés et qui continuent leur désintégration. À partir de la mesure du temps de vol, on sépare les noyaux lourds (dont certains sont ceux qui nous intéressent) des noyaux légers (sans intérêt), car leur vitesse est très différente. Enfin, le détecteur de position élimine les produits indésirables.

Notre première expérience dura 40 jours, entre novembre et décembre 1998. Nous avons alors observé les signaux de trois désintégrations par fission spontanée, indiquant que trois noyaux qui avaient été synthétisés avaient traversé le séparateur avant de fissionner. Deux d'entre eux avaient une période d'environ une milliseconde : ils étaient dus à la désintégration indésirable d'américium 244. Seul un de ces trois événements correspondait à une implantation dans le détecteur, suivie de trois désintégrations alpha, ayant lieu en un même point dans le détecteur d'implantation.

C'est le signal que nous espérons : les relations entre les énergies de désintégration et les temps de désintégration étaient en accord avec les prédictions théoriques de la désintégration d'un isotope de l'élément 114. Le temps de vol du noyau dévié par les aimants et son énergie d'implantation dans le détecteur étaient également conformes aux prévisions. Au total, la probabilité que cet événement ait résulté d'événements indésirables était inférieure à un pour cent.

La chaîne des désintégrations

L'isotope de l'élément 114 à 175 neutrons a une période de désintégration de l'ordre de 30 secondes. Il engendre l'élément 112, après 15,4 minutes. Ce dernier forme ensuite l'élément 110, qui, après 1,6 minute, se désintègre en l'élément 108. L'isotope de l'élément 108, à 169 neutrons, est hors du domaine de stabilité et se désintègre par fission spontanée après 16,5 minutes.

Par une autre expérience réalisée à Dubna, nous avons également obtenu un isotope plus léger de l'élément 114, qui ne comporte que 173 neutrons, ce qui le situe près du bord de l'îlot de stabilité. Cet isotope plus léger a une période de cinq

secondes environ, au terme de laquelle il subit une désintégration alpha et donne l'élément 112, avec 171 neutrons. Ce dernier se désintègre par fission spontanée en trois minutes.

Par ces expériences, nous avons confirmé l'existence de l'îlot de stabilité et nous commençons à apprécier ses effets. La période de notre isotope de l'élément 114 à 175 neutrons est plus de 1 000 fois supérieure à la période de son isotope à 171 neutrons, qui est produit au cours de la chaîne de désintégrations de l'élément 118, et qui a été découvert au printemps 1999, au Laboratoire Lawrence Livermore, à Berkeley. Notre isotope de l'élément 112 à 173 neutrons est un million de fois plus stable que son isotope à 165 neutrons, découvert à Darmstadt en 1996. Ces périodes relativement longues de nos produits de synthèse par fusion facilitent leur étude, ce qui pourrait modifier notre vision des propriétés fondamentales de la matière.

Entre juin et octobre 1999, nous avons aussi obtenu l'isotope de l'élément 114 à 174 neutrons (nous avons réussi à synthétiser deux atomes). L'observation de la désintégration de cet isotope laisse penser que les éléments superlourds pourraient être encore plus stables que ne le prévoit la théorie. L'étude des limites de la stabilité nucléaire est promise à un grand avenir. En conjuguant leurs efforts, les chercheurs parviendront peut-être même à résoudre, pour l'élément 114, le problème considéré comme le plus délicat du processus de synthèse d'un nouvel élément : lui trouver un nom qui convienne à tous ceux qui ont contribué à sa découverte.

Iouri OGANESSION et Vladimir UTYONKOV sont chercheurs au Laboratoire Flerov des réactions nucléaires à l'Institut de recherche nucléaire de Dubna. KENTON Moody travaille au département de chimie analytique et nucléaire du Laboratoire Lawrence Livermore.

Glenn T. SEABORG et Walter LOVELAND, *Search for the Missing Elements*, in *New Scientist*, vol. 131, n° 1784, p. 29, août 1991.

Transuranium Elements : A Half Century, sous la direction de Lester R. Morss et J. Fuger, American Chemical Society, 1992.

Peter ARMBRUSTER et Fritz Peter HESSBERGER, *La création de nouveaux éléments*, in *Pour la Science*, novembre 1998.
