

rôle notable. La taille des orbitales internes se réduit et leur stabilité augmente – l'énergie de ces orbitales diminue, ce qui a des répercussions sur les autres orbitales *s* et *p*. Ces dernières se rapprochent aussi du noyau, y compris les orbitales de « valence », les plus externes, qui régissent les propriétés chimiques de l'atome.

Tous ces phénomènes sont connus sous le nom d'effet relativiste direct, qui augmente en général avec la charge électrique du noyau. Certains effets concurrents compliquent la situation. Alors que l'effet relativiste direct stabilise certaines orbitales, un autre effet, l'effet relativiste indirect, déstabilise les orbitales *d* et *f*. Le phénomène est une sorte d'effet écran électrostatique dû aux électrons *s* et *p*. La charge électrique négative de ces électrons masque en partie la charge positive du noyau dont l'action s'exerce sur les lointains électrons *d* et *f*. Ces derniers sont alors moins liés au noyau, donc plus instables.

Certains effets relativistes à l'œuvre dans les éléments chimiques se manifestent dans la vie quotidienne. Par exemple, ils expliquent la couleur de l'or, qui se distingue des éléments incolores qui l'entourent dans le bloc d'orbitales *d* du tableau périodique – en particulier l'argent, qui se trouve juste au-dessus de l'or dans le tableau.

Quand un atome d'un métal du bloc *d* est frappé par un photon dont la longueur d'onde est adéquate, il subit une transition électronique. Un électron d'une orbitale *d* absorbe le photon et passe dans un

état d'énergie plus élevé correspondant à une orbitale *s* supérieure. Dans le cas de l'argent, l'écart d'énergie entre les deux orbitales est assez grand, de sorte qu'il faut un photon de la région ultraviolette du spectre électromagnétique pour déclencher la transition. Des photons de lumière visible, dont l'énergie est inférieure, sont réfléchis ; c'est pourquoi ce matériau semble être un miroir.

Dans le cas de l'or, la contraction relativiste abaisse l'énergie des orbitales *s*, tout en augmentant l'énergie des orbitales *d*, réduisant ainsi l'écart entre ces deux niveaux. La transition requiert alors moins d'énergie – elle correspond à celle d'un photon de la partie bleue du spectre. Tandis que le bleu est absorbé, les photons des autres couleurs sont réfléchis – d'où la couleur jaune doré caractéristique de l'or.

Pekka Pyykkö, de l'Université d'Helsinki, et d'autres ont répertorié de nombreux comportements de l'or liés aux effets relativistes, en particulier des liaisons inattendues entre l'or et d'autres éléments. Les composés qui, selon eux, devaient résulter de telles interactions ont été découverts par la suite. Cette prouesse rappelle les exploits de Mendeleïev, qui avait prévu l'existence de nouveaux éléments. Parmi les prévisions couronnées de succès de P. Pyykkö figuraient des liaisons entre l'or et le xénon – « gaz rare » qui est extrêmement inerte – et des liaisons triples entre l'or et le carbone. Un autre succès était une molécule sphérique impliquant un

atome de tungstène et 12 atomes d'or et ressemblant aux fullerènes de carbone, avec leur structure en ballon de football. Ce fullerène d'or se forme spontanément quand le tungstène et l'or sont vaporisés en présence d'hélium.

Les calculs de mécanique quantique relativiste se sont aussi révélés indispensables pour étudier comment des dépôts d'or peuvent agir comme catalyseurs, bien que l'or soit relativement inerte. Par exemple, cet élément peut décomposer des substances toxiques contenues dans les gaz d'échappement des automobiles.

Des surprises superlourdes

Même avec l'apparition d'effets relativistes, les éléments comme l'or s'écartent peu des caractéristiques attendues. La plupart des éléments dérogent peu au principe de périodicité et leurs propriétés s'accordent avec leur position dans le tableau périodique. Mais il y a eu des surprises. Certaines expériences sur la chimie des éléments les plus récemment découverts ont commencé à montrer qu'il pourrait bien y avoir de sérieuses failles dans le tableau périodique.

En utilisant des accélérateurs de particules pour faire entrer en collision des noyaux lourds, les physiciens nucléaires sont capables de produire des éléments « superlourds » – ceux qui se trouvent au-delà du numéro atomique 103. Les pre-

SPIRAL 2, une usine à éléments superlourds

La recherche de noyaux dits superlourds est un important champ d'étude en physique nucléaire. En synthétisant ces nouveaux noyaux très exotiques, on espère notamment cerner la limite de la stabilité nucléaire et tester jusqu'où va la validité du principe de périodicité du tableau de Mendeleïev.

Depuis plusieurs décennies, les chercheurs français ont contribué à cette recherche des éléments superlourds par différents biais. En 1970, à Orsay, avec le premier accélérateur complexe d'ions lourds, ALICE, une équipe a recherché l'élément 126 qui correspondait au noyau « magique » succédant à l'isotope 208 du plomb (82 protons et 126 neutrons). Les noyaux magiques sont particulièrement stables. Les mo-

dèles théoriques permettent de prévoir leurs nombres de protons et de neutrons. La découverte de noyaux magiques et d'« îlots » de stabilité (des groupements d'éléments stables dans le diagramme où les axes sont les nombres de protons et de neutrons) aide à préciser les modèles.

À cette époque, une collaboration franco-russe très active s'est orientée vers l'étude chimique des éléments superlourds et des actinides à partir de quelques atomes produits, en développant des méthodes de séparation et d'identification des produits de désintégration des éléments 104 à 109.

Les chercheurs français ont poursuivi les études des éléments superlourds avec les accélérateurs de Dub-

na en Russie et ceux du GANIL (Grand accélérateur national d'ions lourds), à Caen, pour comprendre leur structure, mettre en évidence des caractéristiques telles que leur durée de vie et explorer de nouvelles voies de synthèse... Mais le petit nombre d'atomes produits est un obstacle à leur étude.

À partir de 2015, le GANIL se dotera d'une nouvelle installation, SPIRAL 2. Les faisceaux de noyaux y auront une intensité au mieux 10 fois supérieure. Il sera possible de synthétiser et d'observer les éléments superlourds en grande quantité et avec un temps d'expérience réduit et raisonnable (d'une semaine à un mois). Une équipe internationale de physiciens nucléaires participe au déve-

loppement technique des détecteurs, des cibles pour les faisceaux et d'un spectromètre qui permettra d'identifier les événements rares impliquant des éléments superlourds.

Les expériences apporteront des réponses plus précises sur la localisation du prochain îlot de stabilité et sur la structure des noyaux superlourds. La découverte récente de l'élément 117 par l'équipe de Y. Oganessian pourrait être confirmée par une expérience indépendante. Une façon de procéder passerait par la détection d'un isotope de l'élément 115 obtenu par la désintégration du 117.

Christelle Stodel
Chargée de recherche CNRS
GANIL, Caen

mières expériences des années 1990 sur le rutherfordium (104) et le dubnium (105) suggéraient déjà que ces éléments n'avaient pas les propriétés attendues d'après leur position dans le tableau périodique. Ken Czerwinski et ses collègues, à l'Université de Californie à Berkeley, ont découvert que, en solution, le rutherfordium réagissait de façon similaire au plutonium, qui est très éloigné dans le tableau périodique. De même, le dubnium présentait des signes de comportement comparable à celui du protactinium, élément à nouveau assez éloigné dans le tableau périodique. En l'absence d'effets relativistes, ces deux éléments auraient dû se comporter comme ceux qui se trouvent directement au-dessus d'eux, à savoir le hafnium et le tantale. Ces mesures difficiles restent à confirmer.

Dans les travaux plus récents, les chercheurs ont synthétisé de nouveaux éléments superlourds, mais seulement en nombre limité (la découverte de l'élément 117 repose ainsi sur l'observation de six atomes seulement). De plus, les éléments superlourds sont très instables ; ils se désintègrent en éléments plus légers en une fraction de seconde. Les scientifiques sont réduits à observer les débris de cette décomposition nucléaire, qui fournit des informations sur la physique et la chimie des noyaux éphémères. Ainsi, étudier les propriétés chimiques grâce à la chimie « par voie humide » classique – mettre la substance dans un flacon et observer comment elle réagit avec d'autres composés chimiques – est impossible. Et pourtant les scientifiques ont trouvé des techniques ingénieuses pour étudier la chimie de ces éléments, atome par atome.

Comme le mercure ou comme le radon ?

Les expériences chimiques effectuées sur les deux éléments suivants, le seaborgium (106) et le bohrium (107), ont été décevantes comparées à celles menées sur les éléments 104 et 105. En effet, le seaborgium et le bohrium semblent réagir comme l'anticipent les règles de Mendeleïev, qui ignorent les effets relativistes. Le principe périodique semblait reprendre les commandes !

Dans le cas de l'élément 112, les chimistes et les physiciens ont voulu savoir si cet élément se comporte plutôt comme le mercure, qui se trouve juste au-dessus de lui dans le tableau périodique, ou comme

le radon, un gaz rare, ainsi que le prévoient certains calculs relativistes. Dans quelques expériences, des chercheurs ont synthétisé des atomes de l'élément 112, accompagnés d'isotopes lourds du mercure et du radon. Ces derniers existent à l'état naturel, mais les physiciens utilisent des éléments de synthèse, car ils peuvent les produire dans des conditions identiques à celles qui donnent naissance à l'élément 112.

Les expérimentateurs ont alors déposé ces atomes sur une surface maintenue à très basse température et recouverte en partie d'or et en partie de glace. Si l'élément 112 se comporte vraiment comme un métal, il se liera à l'or. S'il est davantage comparable au radon, il aura tendance à se déposer sur la glace. À ce jour, plusieurs laboratoires ont obtenu des résultats différents, et la situation est encore loin d'être clarifiée.

Les effets relativistes sur l'élément 114 ont aussi été étudiés. Les premiers résultats, rapportés par Robert Eichler et son équipe à l'Institut Paul Scherrer, en Suisse, ont surpris les scientifiques, tant ils vont à l'encontre de la théorie.

La poursuite des recherches sur la chimie des éléments superlourds devrait clarifier les divergences entre résultats expérimentaux et calculs théoriques. Simultanément, de nouveaux éléments seront ajoutés au tableau périodique. Une question plus générale est alors de savoir si ce tableau aura une fin. Le consensus général est que lorsque le nombre de protons devient trop grand, les noyaux ne se forment plus, même pendant un instant. Mais les opinions diffèrent sur le numéro atomique maximal. Selon certains calculs qui considèrent le noyau comme ponctuel, la limite se trouverait à l'élément 137. D'autres, qui ont pris en compte le volume du noyau, estiment que l'élément final sera de numéro atomique 172 ou 173.

On ignore encore si le principe de la périodicité du tableau s'applique aux éléments superlourds. Si les écarts dans les propriétés des atomes deviennent importants et systématiques, le tableau perdra son pouvoir prédictif. Mais cela ne retirera en rien son utilité pour de nombreux éléments. En général, le chimiste n'est pas confronté aux éléments les plus lourds – et instables – du tableau. Ainsi, 150 ans après sa conception, malgré les corrections dues aux effets relativistes, le tableau périodique de Mendeleïev est loin d'être obsolète et rend toujours de nombreux services. ■



Laboratoire Flarov

À la recherche de l'élément 119

Des éléments plus lourds que le 118 existent probablement. Leur découverte obligera à étendre le tableau périodique. Yuri Oganessian (ci-dessus), qui a dirigé l'équipe ayant créé l'élément 117, est maintenant prêt à tenter la synthèse du prochain élément, le 119. Celui-ci sera dans la colonne des alcalins, comme le lithium, le sodium, le potassium et le francium. Mais les effets relativistes pourraient lui donner des propriétés différentes.

■ BIBLIOGRAPHIE

E. Scerri, *A Very Short Introduction to the Periodic Table*, Oxford University Press, 2011.

P. Pykkö, *A suggested periodic table up to $Z \leq 172$, based on Dirac-Fock calculations on atoms and ions*, *Physical Chemistry Chemical Physics*, vol. 13, pp. 161-168, 2011.

E. Scerri, *Le tableau périodique des éléments, d'hier à demain*, *Pour la Science* n° 369, pp. 22-27, juillet 2008.

E. Scerri, *The Periodic Table, its Story and its Significance*, Oxford University Press, 2007.