



98 protons à utiliser comme cibles. Nous essayons maintenant d'identifier quelles combinaisons d'éléments connus et disponibles offrent les meilleures chances de produire de nouveaux noyaux.

Même si les nouvelles espèces atomiques que nous produisons se désintègrent très vite, des percées notables ont été réalisées récemment dans les capacités d'observation et d'analyse des éléments superlourds. Aussi brève soit-elle, la durée de vie de ces atomes permet d'effectuer des expériences pour tester leurs propriétés physiques et chimiques, afin de savoir par exemple s'ils se comportent plutôt comme des métaux ou comme des gaz à température ambiante.

DES PROPRIÉTÉS DIFFICILES À PRÉVOIR

L'élément le plus lourd dont les propriétés chimiques ont été étudiées est le flérovium (l'élément 114, noté Fl), synthétisé pour la première fois en 1998. Il a d'abord laissé perplexes les physiciens. La place de cet atome dans le tableau périodique, juste au-dessous du plomb, implique qu'il devrait se comporter comme n'importe quel atome de métal lourd. Mais selon des théories remontant à 1975, il pourrait en fait prendre modèle sur les gaz dits rares, ces gaz inertes qui interagissent très peu avec d'autres matériaux. Où se situe la vérité?

Ce comportement étrange calculé du flérovium est la conséquence du nombre de protons que son noyau contient et donc de la valeur de sa charge. En raison de la charge positive très élevée des noyaux d'éléments lourds, leurs électrons (de charge négative) ont des vitesses pouvant atteindre 80% de celle de la lumière, et évoluent par conséquent sur des orbites différentes de celles qui caractérisent les éléments plus légers.

Chez le flérovium, par exemple, cet effet conduit à un grand écart d'énergie entre les deux orbites électroniques les plus externes. Ainsi, pour passer d'une orbite à l'autre, l'électron doit acquérir davantage d'énergie que si l'atome avait un noyau plus petit, tel le plomb situé juste au-dessus dans le tableau périodique. Dans le cas du plomb, la formation d'une liaison chimique fournira plus facilement l'énergie nécessaire aux électrons pour surmonter cet écart. En raison du grand écart entre ses niveaux d'énergie, il se peut que le flérovium ne se prête pas aussi facilement à des réactions chimiques que son homologue plus léger. Il pourrait alors ressembler davantage à des éléments réfractaires aux réactions chimiques (les gaz rares) qu'à des métaux typiques tels que le plomb.

Il est toutefois difficile de prédire comment se comportera exactement le flérovium. Les théories s'accordent généralement sur le fait

qu'il devrait être plus inerte que le plomb, mais il est probablement plus réactif que les véritables gaz rares et pourrait former, par exemple, des liaisons métalliques faibles avec des éléments tels que l'or. Comme personne n'a été en mesure de le produire en quantité, on ignore à quoi ressemblerait un morceau fait de cet élément. Selon certains, il prendrait une apparence blanc argenté ou gris pâle et serait solide à température ambiante.

Les intrigantes propriétés du flérovium ont poussé les physiciens à multiplier les expériences bien que leurs capacités de production se limitent à quelques atomes par jour. Pire, les demi-vies des isotopes les plus stables connus du flérovium ne dépassent pas une à deux secondes. L'un des meilleurs équipements dont dispose la communauté pour produire le flérovium est le *Tasca* (pour *TransActinide Separator and Chemistry Apparatus*), «appareil de tri et de chimie des transactinides», les transactinides désignant tous les éléments de numéro atomique supérieur à 103) situé au centre Helmholtz de recherche sur les ions lourds (GSI), en Allemagne, où nous travaillons tous deux.

PREMIÈRES EXPÉRIENCES DE CHIMIE

L'élément superlourd qu'est le flérovium est obtenu en bombardant du plutonium 244 avec un faisceau de calcium 48. Quand des noyaux de flérovium sont produits, des aimants les dirigent vers deux plaques de 32 centimètres de long se faisant face, couvertes chacune de détecteurs au silicium et espacées d'un demi-millimètre.

Les détecteurs sont recouverts d'une très mince couche d'or, ce qui nous permet d'étudier comment les atomes de flérovium interagissent avec ce métal. La première plaque est maintenue à température ambiante, tandis que la seconde est refroidie grâce à de l'azote liquide jusqu'à -160°C . Pourquoi? Parce que les liaisons faibles (comme celles que les gaz rares établissent avec les matériaux) sont suffisamment fortes pour lier les atomes de flérovium à basse température, mais pas à température ambiante. Par conséquent, si le flérovium se comporte plutôt comme un métal, il ira se coller sur la plaque la plus chaude. En revanche, s'il ressemble plutôt à un gaz rare, il se liera à la surface froide ou ne réagira pas du tout.

Quand notre équipe a utilisé ce dispositif expérimental, nous avons observé deux atomes qui se sont tous deux désintégrés dans les détecteurs à température ambiante. Ce résultat laissait penser que le flérovium se liait plus comme un métal que comme un gaz rare. Mais nous avons été contredits par une autre expérience, menée par une équipe de l'institut Paul Scherrer, en Suisse, et réalisée au Laboratoire ➤

► Flerov des réactions nucléaires, en Russie. Sur les trois atomes que les expérimentateurs ont observés, l'un s'est désintégré sur la zone chaude et deux ont été trouvés dans la zone à basse température (maintenue environ à -90°C). Ils favorisent donc l'option gaz rare. Nous sommes nous-mêmes en train d'analyser de nouvelles données obtenues au GSI et espérons qu'elles clarifieront les propriétés de cet élément fascinant.

DES ÉTUDES DE SPECTROSCOPIE

Récemment, l'un de nous (Michael Block) a effectué avec son équipe les premières expériences de spectroscopie laser sur un élément superlourd, le nobélium (l'élément 102). Les chercheurs sont parvenus à produire des atomes de nobélium au rythme de quelques unités par seconde en bombardant une cible de plomb (82 protons) avec des ions de calcium (20 protons). Les atomes de nobélium étaient ensuite ralentis à l'intérieur d'un gaz d'argon et soumis à des impulsions laser. Pour certaines énergies des photons du laser, un électron de l'atome de nobélium absorbait un photon et s'échappait. En faisant varier la fréquence lumineuse, donc l'énergie des photons laser, Michael Block et ses collègues ont ainsi pu mesurer avec précision l'énergie nécessaire pour arracher un électron à l'atome de nobélium. Or cette «énergie d'ionisation» est l'une des propriétés caractéristiques qui assignent la place d'un élément dans le tableau périodique. Elle détermine la probabilité que l'élément réagisse avec d'autres éléments et forme des liaisons chimiques.

Ces analyses ont d'abord été réalisées sur l'isotope 254 du nobélium (^{254}No , qui a 152 neutrons), puis récemment étendues aux isotopes ^{252}No et ^{253}No afin de savoir comment un déficit en neutrons décale les énergies absorbées par les électrons. Les résultats renseigneront aussi sur la variation de la taille et de la forme des noyaux de ces isotopes, car ces caractéristiques du noyau (de charge positive) ont une influence sur le comportement des électrons (de charge négative).

D'autres chercheurs ont, quant à eux, réussi à créer des liaisons chimiques entre des éléments superlourds et des atomes plus modestes pour étudier comment les espèces exotiques interagissent. Un exemple récent de ce type de recherches est la synthèse de molécules contenant du seaborgium (l'élément 106, de symbole Sg). Dans des expériences réalisées au centre Nishina du Riken, au Japon, une équipe internationale dirigée par le groupe de Christoph Düllmann a produit un isotope de seaborgium dont la demi-vie est d'une dizaine de secondes. Du monoxyde de carbone (CO) a ensuite été ajouté dans l'enceinte contenant le seaborgium et cet élément lourd s'est alors

On est parvenu à créer des liaisons chimiques impliquant des atomes superlourds

transformé en un composé hexacarbonyle $\text{Sg}(\text{CO})_6$ où six molécules de monoxyde de carbone sont liées à l'atome central de seaborgium.

Christoph Düllmann et ses collègues ont montré que dans cette situation, le seaborgium se comporte en fait essentiellement comme ses homologues plus légers et plus courants que sont le tungstène et le molybdène, au même nombre d'électrons de valence.

LE SEABORGIUM, HOMOLOGUE DU MOLYBDÈNE ET DU TUNGSTÈNE

En effet, grâce à une expérience qui s'est déroulée en continu sur une quinzaine de jours, les chercheurs ont observé le seaborgium former le même type de composé avec des molécules de monoxyde de carbone que le molybdène et le tungstène, et au même taux. Les scientifiques vont maintenant tester lequel de ces trois éléments forme les liaisons les plus stables avec le monoxyde de carbone. D'après des calculs effectués à la fin des années 1990, il s'agirait du seaborgium, mais des simulations plus récentes et plus élaborées prévoient que les liaisons entre le monoxyde de carbone et le seaborgium seront plus faibles qu'avec le tungstène.

Ce ne sont là que quelques exemples du type d'expériences fascinantes que les chercheurs réalisent aujourd'hui sur les éléments superlourds, et des nombreuses questions ouvertes auxquelles ils espèrent apporter une réponse. Bien que les nouveaux membres du tableau périodique soient rares et exotiques, les études expérimentales nous apportent des informations directes sur la façon dont ils s'insèrent dans le tableau décrivant les éléments plus classiques, que nous rencontrons dans la vie de tous les jours. Qu'ils soient instables ou d'une grande longévité (et que nous trouvions ou non un jour le cœur de l'îlot de stabilité), les éléments superlourds ont beaucoup à nous apprendre sur les rouages des briques chimiques de la nature. ■

BIBLIOGRAPHIE

S. Raeder et al., **Probing sizes and shapes of nobelium isotopes by laser spectroscopy**, *Physical Review Letters*, vol. 120, article 232503, 2018.

M. Laatiaoui et al., **Atom-at-a-time laser resonance ionization spectroscopy of nobelium**, *Nature*, vol. 538, pp. 495-498, 2016.

C. E. Düllmann et al., **Special Issue on Superheavy Elements**, *Nuclear Physics A*, vol. 944, pp. 1-690, 2015.

I. Oganessian et al., **À la recherche de l'îlot superlourd**, *Pour la Science*, n° 269, pp. 60-65, mars 2000.