

peu élastique. Ce n'est que plus tard qu'il associe ce faisceau de perceptions à un objet cohérent d'un certain type, à savoir un ballon. La prochaine fois qu'il verra un ballon, il dira simplement « Tiens, un ballon! », et il oubliera l'appareil conceptuel qui intervient dans cette perception qui n'est immédiate qu'en apparence.

Dans l'ontologie des tropes, nous revenons aux perceptions directes de l'enfance. Ici-bas dans le monde, les choses ne sont que des faisceaux de propriétés. Nous ne commençons pas par voir un ballon, auquel nous attachons ensuite des propriétés. Au contraire, nous avons un ensemble de propriétés et ensuite seulement nous nommons cela un ballon. Un ballon n'est rien de plus que ses propriétés.

De la métaphysique pour guider la physique

Appliquons cette idée à la théorie quantique des champs : ce que nous nommons un électron est en fait un faisceau de diverses propriétés ou tropes : trois propriétés essentielles fixes (masse, charge et spin), ainsi que de nombreuses propriétés non essentielles changeantes (position, vitesse). Cette conception en termes de tropes aide à comprendre la théorie quantique des champs. Par exemple, cette théorie prédit que les particules élémentaires peuvent apparaître subitement et disparaître tout aussi rapidement. Le comportement du vide en théorie quantique des champs est particulièrement déconcertant : la valeur moyenne du nombre de particules est zéro, et pourtant le vide fourmille d'activité. D'innombrables processus y ont lieu en permanence, impliquant la création suivie de l'annihilation de toutes sortes de particules.

Dans une ontologie à base de particules, cette activité est paradoxale. Si les particules sont fondamentales, comment alors peuvent-elles se matérialiser ? À partir de quoi se matérialisent-elles ? Dans l'ontologie des tropes, la situation est naturelle. Le vide, bien que vide de particules, contient des propriétés. Une particule est ce que l'on obtient quand ces propriétés se regroupent d'une certaine façon.

Comment peut-il y avoir autant de controverse fondamentale sur une théorie aussi fructueuse, empiriquement, que la théorie quantique des champs ? La réponse est simple. Bien que la théorie nous dise ce que nous pouvons mesurer, elle parle en

énigmes dès lors qu'il est question de la nature des entités à l'origine de nos observations. La théorie rend compte de nos observations en termes de quarks, muons, photons et divers champs quantiques, mais elle ne nous dit pas ce qu'est véritablement un photon ou un champ quantique. Et elle n'a pas besoin de le faire, parce que les théories physiques peuvent être empiriquement valables en grande partie sans régler ces questions métaphysiques.

Pour de nombreux physiciens, c'est suffisant. Ils adoptent une attitude dite instrumentaliste : selon eux, les théories scientifiques ne représentent pas nécessairement la réalité du monde. Pour eux, les théories ne sont que des outils pour faire des prédictions expérimentales. Cependant, de nombreux physiciens ont le sentiment que leurs théories décrivent au moins certains aspects de la nature telle qu'elle est avant qu'une mesure ne soit effectuée. Après tout, que fait la science, sinon tenter de comprendre le monde ?

Pour broser un tableau complet du monde physique, il est nécessaire de combiner la physique et la philosophie. Ces deux disciplines sont complémentaires. La métaphysique fournit divers cadres concurrents pour l'ontologie du monde matériel, même si, au-delà des questions de cohérence interne, elle n'est pas en mesure de trancher entre eux. Quant à la physique, il lui manque un exposé cohérent des questions fondamentales, telles que la définition de ses objets, le rôle de l'individualité, le statut des propriétés, la relation entre objets et propriétés, et la signification de l'espace et du temps.

La réunion des deux disciplines est particulièrement importante à certaines époques où les physiciens sont amenés à revisiter les fondements de leur domaine. La pensée métaphysique a guidé Isaac Newton et Albert Einstein, et elle influence beaucoup de ceux qui essaient d'unifier la théorie quantique des champs et la théorie de la gravitation d'Einstein. Les livres et articles écrits par des philosophes sur la physique quantique et la théorie de la gravitation remplissent des bibliothèques entières, alors que nous ne faisons que commencer à explorer la réalité sous-jacente à la théorie quantique des champs. Espérons que les alternatives aux visions classiques des particules et des champs que nous développons inspireront les physiciens dans leurs efforts pour réaliser enfin la grande unification. ■

BIBLIOGRAPHIE

M. Esfeld, *Ontic structural realism and the interpretation of quantum mechanics*, *European Journal for Philosophy of Science*, vol. 3(1), pp. 19-32, 2013.

M. Kuhlmann, *Quantum field theory*, *Stanford Encyclopedia of Philosophy*, hiver 2012, <http://plato.stanford.edu/archives/win2012/entries/quantum-field-theory>

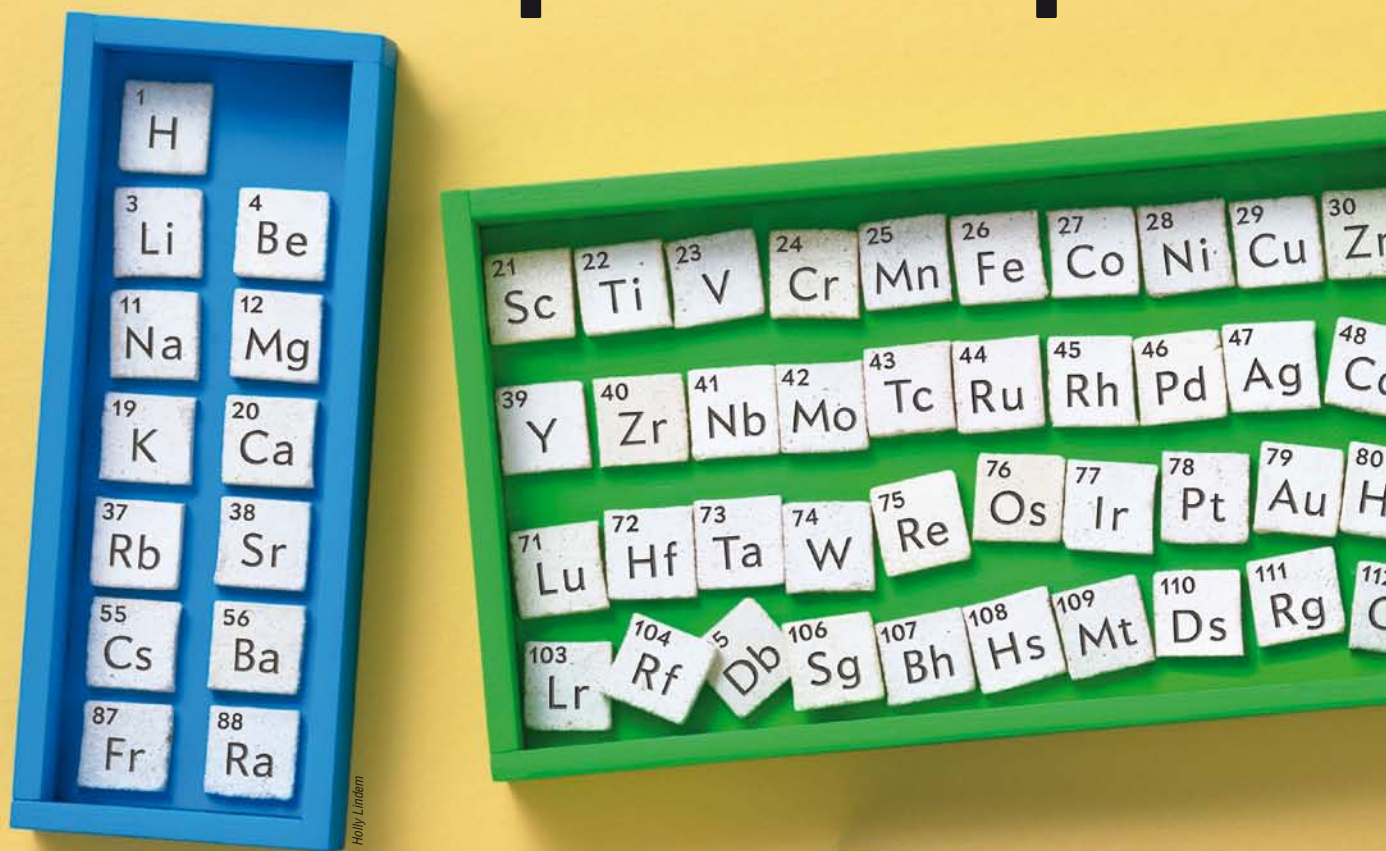
M. Kuhlmann, *The Ultimate Constituents of the Material World : In Search of an Ontology for Fundamental Physics*, Ontos Verlag, 2010.

J. Bricmont et H. Zwirn (dir.), *Philosophie de la mécanique quantique*, Vuibert, 2009.

D. J. Baker, *Against field interpretations of quantum field theory*, *British Journal for the Philosophy of Science*, vol. 60(3), pp. 585-609, 2009, <http://philsci-archive.pitt.edu/4132/1/AgainstFields.pdf>

M. Kuhlmann et al. (éds.), *Ontological Aspects of Quantum Field Theory*, World Scientific, 2002.

Des failles dans le tableau périodique



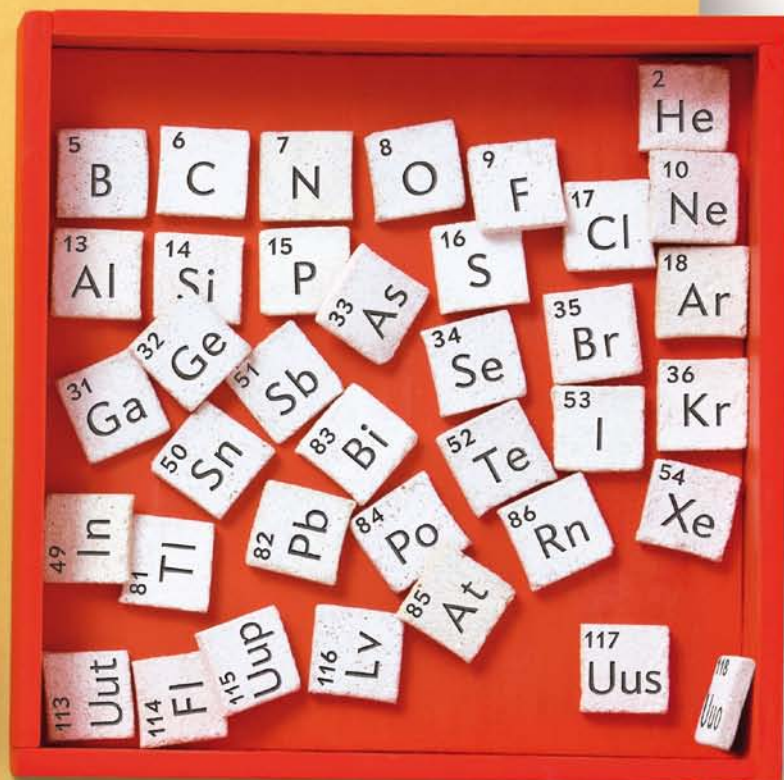
Eric Scerri

En 2010, des physiciens russes ont annoncé qu'ils avaient synthétisé les premiers noyaux atomiques de l'élément chimique 117, qui comportent 117 protons. Ce nouvel élément n'a pas encore de nom, car la communauté scientifique attend toujours une confirmation indépendante avant de lui en donner un. Mais, sauf surprises, l'élément de numéro atomique 117 a désormais sa place au sein du tableau périodique des éléments.

Jusque-là, tous les éléments jusqu'au 116, plus l'élément 118, avaient été découverts. Certains attendent cette fameuse confirmation indépendante. C'était le cas de l'élément 115, déjà synthétisé en 2004, mais dont l'observation vient d'être confirmée, en août 2013, par une équipe internationale.

Ainsi, le seul élément qui manquait à l'appel était le 117. Sa découverte permet de remplir la dernière case qui restait vide dans la ligne inférieure du tableau. Ce succès marque un moment unique dans l'histoire de la chimie. Depuis les travaux d'Antoine Laurent de Lavoisier à la fin du XVIII^e siècle, de nombreux chimistes ont tenté de recenser les éléments et de les organiser selon certaines règles. Dans les années 1860, le chimiste russe Dmitri Mendeleïev et d'autres ont élaboré le tableau périodique des éléments, très proche de celui que

La découverte de l'élément 117 a permis de remplir le dernier trou dans le tableau de Mendeleïev tel que nous le connaissons. Mais ce tableau aux propriétés remarquables pourrait présenter des défauts.



l'on utilise aujourd'hui. Mendeleïev laissa plusieurs cases vides dans son tableau, et il fit le pari audacieux qu'un jour, de nouveaux éléments seraient découverts qui viendraient combler ces lacunes. Depuis, les prévisions du chimiste russe ont été confirmées.

Le tableau périodique a connu des aménagements, des ajouts, mais un principe essentiel a été préservé : sa structure repose sur des propriétés récurrentes parmi les éléments. En outre, le tableau a toujours eu des trous, mais avec l'élément 117, il est complet pour la première fois.

Le fantôme de Mendeleïev doit savourer son triomphe. Cependant, des chimistes et des physiciens nucléaires tentent de synthétiser des éléments de numéro atomique dépassant 118. Une telle découverte nécessiterait d'ajouter des lignes comportant de nouvelles cases vides.

Cette extension du tableau devrait continuer d'en suivre la logique de construction. Cependant, quelques anomalies plus fondamentales commencent à poindre. Le principe même des propriétés récurrentes ne semble plus infaillible.

Quand Mendeleïev a conçu son tableau, il n'a pas seulement prévu l'existence d'éléments non encore observés ; de façon plus remarquable, il a deviné correctement leurs propriétés chimiques, en se fondant sur ces motifs récurrents.

En principe, deux éléments de la même colonne ont des propriétés similaires. Mais à mesure que le numéro atomique – le nombre de protons dans un noyau – augmentait, certains des éléments ajoutés ne se comportaient plus de la façon requise par le principe périodique. Les interactions chimiques de ces éléments, par exemple le type de liaisons qu'ils forment avec d'autres atomes, ne ressemblent pas à celles des autres éléments de la même colonne du tableau.

Pour quelle raison ? Autour des noyaux les plus lourds, certains des électrons sont en orbite à des vitesses représentant une fraction non négligeable de la vitesse de la lumière. Ils sont « relativistes », c'est-à-dire que les effets de la théorie de la relativité se font sentir. Le comportement de ces atomes diffère de celui attendu d'après leur position dans le tableau périodique. En outre, les

L'ESSENTIEL

- La découverte de l'élément 117 a permis de compléter le tableau périodique.
- Certains éléments lourds diffèrent par leur comportement chimique des éléments situés dans la même colonne, dérogeant aux principes d'organisation du tableau.
- Ces divergences seraient dues à des effets décrits par la théorie de la relativité restreinte et portant sur les électrons de l'atome.
- Les physiciens nucléaires étudient les propriétés des éléments les plus lourds du tableau pour comprendre ces effets.

LE TABLEAU PÉRIODIQUE COMPLET

semble marquer la réussite du projet de Mendeleïev et confirmer le principe de périodicité. Mais la théorie de la relativité restreinte vient noircir... le tableau.

calculs pour prévoir exactement les effets relativistes des électrons d'un atome sont complexes et l'étude de chaque élément requiert l'expérimentation. Ainsi, malgré le succès du tableau de Mendeleïev enfin rempli, sa puissance de prédiction semble avoir atteint une limite.

Il existe plus de 1000 versions du tableau périodique avec des variantes dans l'arrangement des éléments, mais toutes partagent une caractéristique essentielle. Quand on dispose les éléments séquentiellement, dans l'ordre du numéro atomique, leurs propriétés chimiques tendent à se répéter de façon périodique. Par exemple, si nous partons du lithium et que nous avançons de huit cases, nous arrivons au sodium. Ces éléments ont de nombreuses caractéristiques communes. Tous deux sont des métaux assez mous pour être coupés avec un couteau, et tous deux réagissent vivement avec l'eau. Et si nous avançons encore de huit cases, nous atteignons le potassium, qui est aussi un métal mou et réagit avec l'eau.

Dans les tout premiers tableaux périodiques, incluant ceux conçus par Mendeleïev, la longueur de chaque période – et donc la longueur de chaque rangée (ou ligne) – était toujours de huit. Le tableau était agencé pour avoir, par exemple, le lithium, le sodium et le potassium dans la même colonne. Bientôt, cependant, on découvrit que les quatrième et cinquième périodes ne se répètent pas après huit éléments, mais après 18. En conséquence, les quatrième et cinquième rangées du tableau sont plus larges que les précédentes afin de recevoir le bloc supplémentaire d'éléments (les métaux de transition, qui se trouvent au milieu du tableau périodique dans la version usuelle).

La sixième période se révéla être encore plus longue, contenant 32 éléments, en raison de l'inclusion d'une nouvelle série de 14 éléments. Ceux-ci forment avec le lutécium la famille des lanthanides (qui appartiennent aux terres rares).

À partir de 1937, les physiciens nucléaires ont commencé à synthétiser de nouveaux éléments, en commençant par le technétium. Celui-ci venait combler l'une des quatre lacunes du tableau périodique connu alors, qui allait de 1 (l'hydrogène) à 92 (l'uranium). Les trois autres pièces

manquantes suivirent peu après ; deux d'entre elles ont été synthétisées (l'astate et le prométhium) et la troisième a été découverte dans la nature (le francium). Mais alors même que ces lacunes étaient comblées, de nouvelles découvertes ajoutaient des éléments au-delà de l'uranium, laissant de nouvelles cases vides dans le tableau périodique.

Le chimiste américain Glenn Seaborg remarqua que l'actinium, le thorium, le protactinium, l'uranium et les dix éléments suivants faisaient partie d'une nouvelle série, qui comportait 14 éléments. Avec le lawrencium, on les nomme les actinides.

Au cours de la première moitié du XX^e siècle, les physiciens et les chimistes ont compris que la périodicité des éléments trouve son origine dans la physique quantique et, en particulier, dans la physique des électrons en orbite autour du noyau. Ces orbites, ou « orbitales », ne ressemblent pas à celles des planètes, qui décrivent des ellipses autour du Soleil. Elles correspondent à des régions de l'espace autour du noyau où il est possible de localiser l'électron lors d'une mesure. Elles se présentent sous différentes formes et tailles (voir l'encadré page ci-contre).

Les atomes de numéros atomiques élevés ont les mêmes types d'orbitales que ceux de numéros inférieurs, mais s'y ajoutent de nouveaux types d'orbitales. Les éléments de la première période ont uniquement une orbitale, de type noté *s*, qui peut être occupée par un ou deux électrons (un pour l'hydrogène, deux pour l'hélium). Pour les éléments des deuxième et troisième périodes s'ajoutent une autre orbitale de type *s* et trois orbitales d'une nouvelle sorte, notée *p*. Chacune de ces quatre orbitales peut être occupée par un ou deux électrons, pour un potentiel total de huit électrons – d'où la périodicité de huit dans les versions originales de la classification périodique. Les quatrième et cinquième périodes ont, en plus des types *s* et *p*, un troisième type d'orbitale, noté *d*, qui ajoute dix places supplémentaires pour les électrons et, par conséquent, étend les périodes à 18. Enfin, les deux derniers cycles ont des orbitales de types *s*, *p*, *d* et *f*, et ont une longueur de 32 éléments (18 + 14).

Quand Yuri Oganessian et ses collaborateurs à l'Institut unifié de physique nucléaire, à Doubna, près de Moscou, ont annoncé qu'ils avaient synthétisé « l'insaisissable » élément 117, tous les éléments de

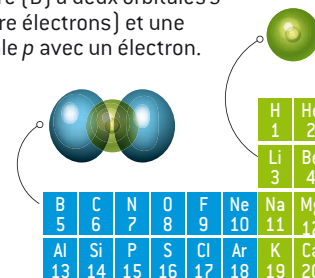
Le tableau périodique classe les éléments chimiques en fonction de leurs propriétés chimiques récurrentes. Celles-ci sont déterminées par les orbites des électrons d'un atome autour de son noyau, ou « orbitales » – en particulier par les orbitales les plus externes. En allant des numéros atomiques les plus bas aux plus élevés, la structure des orbitales externes change d'une façon périodique. Par exemple, les éléments 5 à 10 ont des orbitales externes de type *p*, tout comme les éléments 13 à 18. Tous ces éléments appartiennent au même « bloc *p* » (*en bleu*).

Un nouvel élément, un nouveau bloc

Cette version du tableau périodique est nommée le « tableau en escalier de Janet », d'après le Français Charles Janet (1849-1932), ingénieur, inventeur, chimiste, entomologiste, etc. ! Ce tableau conserve les colonnes du tableau classique et met en évidence la régularité des orbitales et leur remplissage. Les orbitales externes des éléments 119 et 120 seront de type *s*. L'élément 121 sera le premier à avoir des orbitales appartenant à une nouvelle famille, de type *g*.

Exemples de structures :

le lithium (Li) a deux orbitales s qui contiennent au total trois électrons (non représentés). Le bore (B) a deux orbitales s (quatre électrons) et une orbitale p avec un électron.



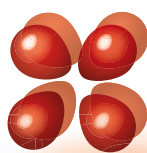
Sc 21	Ti 22	V 23	Cr 24	Mn 25	Fe 26	Co 27	Ni 28	Cu 29	Zn 30	Ga 31	Ge 32	As 33	Se 34	Br 35	Kr 36	Rb 37	Sr 38
Y 39	Zr 40	Nb 41	Mo 42	Tc 43	Ru 44	Rh 45	Pd 46	Ag 47	Cd 48	In 49	Sn 50	Sb 51	Te 52	I 53	Xe 54	Cs 55	Ba 56
Lu 71	Hf 72	Ta 73	W 74	Re 75	Os 76	Ir 77	Pt 78	Au 79	Hg 80	Tl 81	Pb 82	Bi 83	Po 84	At 85	Rn 86	Fr 87	Ra 88
	Rf 103	Db 104	Sg 105	Bh 106	Hs 107	Mt 108	Ds 109	Rg 110	Cn 111	Uut 112	Fl 113	Uup 114	Uuq 115	Uus 116	Uuh 117	Uu 118	

[illegible]

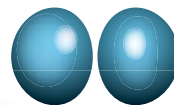
Toutes les deux périodes, et donc toutes les deux rangées du tableau périodique, une nouvelle famille d'orbitales électroniques apparaît. Les formes des orbitales indiquent où l'électron a la probabilité la plus élevée de se trouver.



Orbitale g

Orbitale f 

Orbitale d

Orbitale p 

Orbitale s

la dernière ligne du tableau se trouvaient désormais en place. La relation entre la structure du tableau périodique et celle des atomes montre bien que ce tableau n'est pas simplement une affaire d'esthétique ou d'organisation de l'information sur le papier. L'élément 118, le dernier du tableau, a ainsi toutes ses orbitales s , p , d et f remplies par des électrons.

Si de nouveaux éléments sont synthétisés, il faudra ajouter une rangée de plus au tableau périodique. L'élément 119, probablement le suivant à apparaître sur la liste, devrait amorcer un nouveau cycle – avec à nouveau le type le plus simple d'orbitales, l'orbitale *s*. Les éléments 119 et 120 devraient occuper les deux premières cases de la huitième période. Mais avec l'élément 121, un bloc totalement nouveau serait nécessaire. Il mettrait en jeu des orbitales jamais rencontrées auparavant : les orbitales *g*. Ce nouveau type d'orbitales ajoute des possibilités pour les électrons et

■ L'AUTEUR



Eric SCERRI
est historien
et philosophe
de la chimie
à l'Université
de Californie
à Los Angeles, aux États-Unis.

donc allonge la période, ce qui augmente le nombre de colonnes dans le tableau. Ce bloc d'éléments devrait porter à 50 le nombre de colonnes du tableau.

Mais avant de devoir ajouter une nouvelle période au tableau, les chimistes rencontrent un autre type de difficulté. Le tableau périodique complet – c'est-à-dire avec toutes ses rangées connues remplies – semble marquer la réussite du projet de Mendeleïev et confirmer le principe de périodicité. Mais la théorie de la relativité restreinte due à Albert Einstein vient noircir... le tableau.

Des électrons relativistes

La charge électrique du noyau atomique, due aux protons, augmente avec le numéro atomique. Plus cette charge est importante, plus les électrons des orbitales internes ont une vitesse élevée. Pour les noyaux lourds, la théorie de la relativité restreinte joue alors un

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 groupés 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 Flerov

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.

HISTOIRE DES SCIENCES

Innovations et secrets, les « plis cachetés » de l'Académie des sciences

Depuis 1735, il est possible de déposer à l'Académie française des sciences une réflexion scientifique ou une invention sous la forme d'un pli cacheté. Qui sont les auteurs de ces plis ?

Edgardo D. CAROSELLA et Pierre BUSER

Au XVIII^e siècle, en France, fut créée à l'Académie royale des sciences une procédure grâce à laquelle toute personne pouvait déposer, auprès de son secrétaire perpétuel, des réflexions dans un domaine précis de la science, un point de vue, un message ou une invention qui lui auraient paru dignes d'être conservés. Le pli [jadis nommé paquet, puis paquet] était cacheté, signé par son auteur, et son dépôt était en général accepté. L'auteur pouvait ensuite le retirer ou, au contraire, lui-même ou ses ayants droit avaient la possibilité d'en demander ultérieurement l'ouverture.

Depuis le dépôt du premier pli, en 1735, beaucoup sont restés clos et se sont de la sorte accumulés. C'est pourquoi une Commission fut créée en 1976, sous l'impulsion du secrétaire perpétuel Paul Germain. Sa mission était de procéder à l'ouverture des plis 100 années après le dépôt, à moins que les légataires ayants droit l'aient exigée plus tôt ou que le déposant lui-même, toujours vivant, l'ait demandée.

Jusqu'ici, la Commission s'est toujours pliée à ces diverses règles en essayant (car telle est sa tâche essentielle) de décider, lors de ses réunions (en principe bisannuelles), de l'intérêt d'un pli qui vient d'être ouvert et de désigner d'éventuels rapporteurs qui évalueront sa valeur scientifique. Le cas échéant, elle préconise son insertion, avec commentaires, dans une des publications de l'Académie.

Si cette procédure fut jadis créée, c'est parce que l'Académie royale des sciences avait alors parmi ses attributions premières « l'examen des machines ». Cette mission lui avait été confiée afin que soit déterminé l'intérêt économique des inventions, de façon à les protéger des contrefaçons ou de procédés concurrents. Entre 1666 et 1735, l'Académie a ainsi accordé son agrément à 377 machines, conférant à leurs auteurs un privilège exclusif d'exploiter cette découverte. Et, de fait, le premier pli ouvert le 27 octobre 1976 débute ainsi : « Comme j'appréhende que l'ouvrier qui travaille mes machines ne divulgue mon dessein... »

Mais bientôt s'est imposée une importante restriction à propos des droits que confèrent les plis cachetés. Dès 1844, une loi a spécifié que « l'antériorité ne résulte pas d'un mémoire déposé sous pli cacheté à une société savante et ouvert postérieurement à la demande du brevet », ce qui, bien sûr, incluait ceux qui avaient été déposés à l'Académie. Dès lors a disparu toute stratégie commerciale qui aurait pu tenter certains déposants, les règles en vigueur à l'Académie stipulant que le dépôt d'un pli ne peut en aucun cas constituer une prise de date équivalant à celle d'un brevet. En somme, si un flou a existé à cet égard dans les temps anciens, certains dépôts de plis pouvant être mis au compte d'un tel intérêt, toute tentative d'utiliser les plis cachetés comme dépôt de brevet est ensuite devenue exclue et inopérante.

Quelles motivations animent les déposants ? Que cache ce besoin de mettre au secret ses propres pensées et hypothèses ? C'est ce que nous avons essayé de découvrir en nous livrant à une sorte d'enquête socioculturelle et psychologique sur les plis cachetés et le contexte de leur dépôt. Certes, dans nombre de cas, il reste difficile de déterminer le pourquoi d'un dépôt, que le déposant soit déjà connu ou qu'il ne le soit pas encore, ou encore qu'il soit destiné à rester inconnu. On ne peut toutefois éviter certaines inférences, dont voici quelques exemples.

Plus de 16 000 plis entre 1735 et 1983

Tout d'abord, quelques chiffres. Entre 1735 et 1983, plus de 16 000 plis cachetés ont été déposés, soit environ 6 par an de 1730 à 1830, et 95 par an de 1830 à 1983. Parmi les auteurs de quelque 7 000 plis déposés pendant la période 1760-1960, on dénombre environ 800 membres de l'Académie, 1 500 ingénieurs, 1 400 médecins, 1 360 professeurs et chercheurs, 400 officiers, 280 artisans, etc.

Le nombre de plis fluctue selon les années. Cette variation reflète certes les événements historiques ou politiques de la vie française, mais aussi, nous le verrons, des événements scientifiques ou techniques généralement extérieurs à l'Académie. Ainsi a-t-on noté une affluence de plis au cours de la Première Guerre mondiale, autour de 1917,