

son comportement vis-à-vis d'une inversion des axes du repère de coordonnées spatiales).

La recherche de tels systèmes multiquarks s'est alors développée. Elle est devenue, en l'espace de quelques années, un domaine d'étude à part entière de la physique expérimentale des particules, forte de nombreux succès. En 2003, les physiciens de l'expérience *Belle*, au centre japonais de recherches KEK à Tsukuba, ont découvert une nouvelle résonance dans des collisions électron-positron. En physique des particules, on entend par « résonance » un système instable, un état intermédiaire d'une très courte durée de vie qui apparaît dans un processus de désintégration. La résonance découverte dans l'expérience *Belle* se désintègre en un méson J/ψ (composé d'un quark c et d'un antiquark $\bar{c}$, on l'appelle aussi charmonium) et en deux pions. Cette résonance ressemble à celle que l'on observe pour le méson J/ψ lui-même, mais la durée de vie de cette nouvelle résonance est bien plus longue que celle du méson J/ψ .

La fructueuse chasse aux tétraquarks

La nouvelle résonance a été examinée avec précision dans d'autres expériences, à Stanford, au Fermilab ou au LHC, de sorte qu'il n'y a maintenant aucun doute quant à son existence. Une analyse précise par la collaboration *LHCb* a permis de déterminer son spin et sa parité. La particule a été nommée $X(3872)$, où le nombre correspond à la masse de la particule en mégaelectronvolts, soit 3,872 GeV. Elle est donc près de quatre fois plus lourde qu'un proton.

Au vu de son possible contenu en quarks de valence ($c\bar{c}u\bar{u}$), il pourrait s'agir d'un véritable tétraquark ; sa structure n'est toutefois pas encore complètement élucidée. En effet, cette résonance pourrait ne pas être une particule unique, mais une association formée d'un méson D^0 ($c\bar{u}$) et d'un antiméson $\bar{D}^0$ ($\bar{c}u$). Le contenu en quarks de valence est le même, mais la structure est différente. Les deux mésons seraient liés par une force résiduelle de l'interaction forte agissant entre les quarks, une force résiduelle analogue à celle qui maintient les protons et les neutrons au sein du noyau atomique ou les atomes au sein d'une molécule ; on parle pour cette raison d'état dimoléculaire.

L'hypothèse d'un méson habituel, fait d'un quark et d'un antiquark, n'est pas non plus complètement exclue, mais semble moins probable au vu de résultats de la collaboration *LHCb* publiés en 2013. Les données les plus récentes du LHC, obtenues avec des collisions proton-proton à une énergie de 13 téraélectronvolts (1 téraélectronvolt, ou TeV, correspond à 1 000 GeV, soit 10^{12} électronvolts), sont en cours d'analyse et permettront peut-être d'en savoir plus sur cette résonance.

En 2007, la collaboration *Belle* a détecté un autre candidat au titre de tétraquark, le $Z^+(4430)$, dont le contenu en quarks de valence serait $c\bar{c}u\bar{d}$. Sa détection a été confirmée en 2014 par la collaboration *LHCb*.

La liste de potentiels tétraquarks continue de s'allonger avec le $Z_c(3900)$ – observé en 2013 par la collaboration *Belle* et au BEPC (le collisionneur électron-positron de Beijing, en Chine) – et quatre candidats annoncés en juin 2016 par la collaboration *LHCb* (voir l'encadré page 23).

Mais qu'en est-il des pentaquarks ? Leur recherche a été plus longue et houleuse. Par exemple, en 2002, dans l'expérience *SPring-8* au Japon, la résonance notée Θ^+ a été interprétée comme étant un pentaquark. D'après les données, cette résonance correspondait à une particule environ 1,6 fois plus massive que le proton et de très courte durée de vie, de l'ordre de 10^{-23} seconde. On supposait que son contenu en quarks était $uudd\bar{s}$. La valeur de sa masse était très encourageante, car elle était très proche de celle d'un pentaquark prévu par des théoriciens en 1997. Plusieurs autres groupes d'expérimentateurs à travers le monde ont cru aussi avoir obtenu des indices de l'existence de ce pentaquark. Cependant, en reprenant les analyses statistiques de ces expériences, certains physiciens ont émis des doutes.

D'autres expériences ont alors été conçues pour traquer le pentaquark, sans succès, et il est aujourd'hui très peu probable que Θ^+ soit bien un pentaquark.

La recherche de pentaquarks composés de quarks légers u , d et s semble n'avoir donné que des résultats négatifs. En 2015, la collaboration *LHCb* a publié un article annonçant la détection de pentaquarks contenant des quarks c (voir l'encadré page 26). Les chercheurs de cette expérience étudiaient les désintégrations d'un type

Glossaire

INTERACTION FORTE

L'une des quatre interactions fondamentales, les autres étant la gravitation, la force électromagnétique et l'interaction faible. Les interactions faible et forte n'agissent qu'à des distances subatomiques.

QUARK

Constituant élémentaire de la matière, sensible à l'interaction forte.

GLUON

Particule élémentaire qui véhicule l'interaction forte et qui lie les quarks entre eux.

HADRON

Particule constituée de quarks.

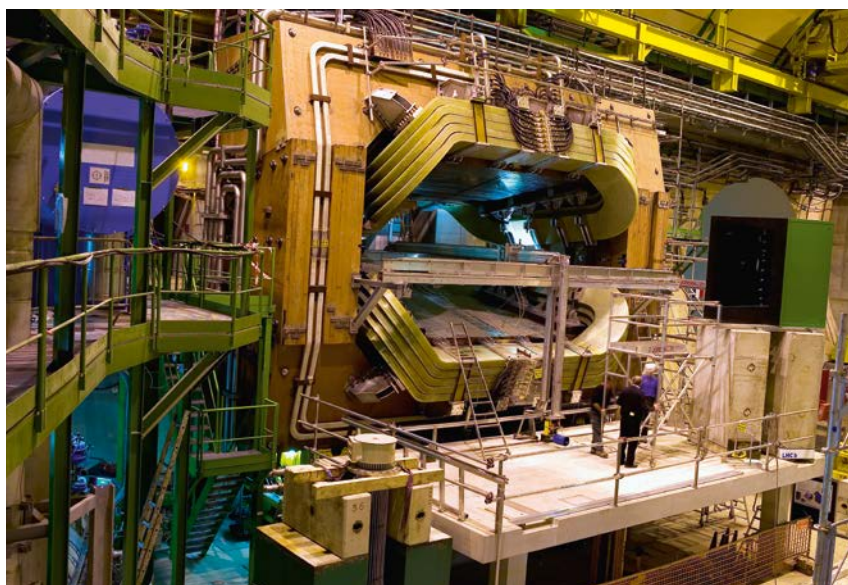
MÉSON

Hadron constitué d'un quark et d'un antiquark liés.

BARYON

Hadron constitué de trois quarks liés. Le proton et le neutron sont les baryons les plus légers.

La recherche des pentaquarks et des tétraquarks est devenue un sujet d'étude à part entière en physique expérimentale



© Maximilien Brice/CERN

AU CERN, LORS DE L'ASSEMBLAGE de l'expérience *LHCb*. Ce dispositif et l'équipe qui le gère sont spécialisés dans l'étude de particules contenant un quark *b*. C'est lors de la désintégration de ces particules instables que des systèmes à quatre ou cinq quarks ont été produits.

particulier de baryon (noté Λ_b^0) engendré lors de collisions proton-proton. L'objectif visé était initialement de déterminer avec plus de précision la durée de vie de ces particules à désintégration rapide. Avec une masse d'environ 5,6 GeV, ces baryons électriquement neutres sont 6 fois plus lourds que les neutrons. Comme ces derniers, ils ont trois quarks de valence : udb , comme si l'un des deux quarks d légers du neutron (udd) avait été remplacé par un quark b , plus lourd.

Dans cette expérience, les physiciens n'ont pas seulement déterminé plus précisément la durée de vie moyenne, égale à 1,48 picoseconde ($1,48 \times 10^{-12}$ seconde); ils ont aussi découvert la désintégration de ce baryon en un kaon négativement chargé (un méson $\bar{u}s$), un méson J/ψ ($c\bar{c}$) et un proton (uud). Cette désintégration, pour passer d'un total de trois quarks à sept avec des saveurs différentes, requiert plusieurs processus parfaitement décrits par le modèle standard. Qui plus est, l'analyse des particules produites a mis en évidence des structures caractéristiques de résonance à des énergies de 4,38 et 4,45 GeV, ce qui correspond à environ 4,7 fois la masse du proton. Ces résonances sont des états intermédiaires formés lors de la désintégration du Λ_b^0 , chacun se décomposant à son tour pour former le J/ψ et le proton; ces états ont ainsi pour quarks de valence $uc\bar{c}ud$ (voir l'encadré page 26).

Comme pour certains des tétraquarks, une incertitude persiste: il n'est pas évident que ces résonances correspondent à de véritables pentaquarks, c'est-à-dire d'objets

compacts à peu près sphériques, faits de cinq quarks étroitement liés par les gluons. En effet, il pourrait aussi s'agir d'un méson J/ψ et d'un baryon liés par une force résiduelle de l'interaction forte. Comme pour les combinaisons de deux mésons dans les tétraquarks, on parle de structure dimoléculaire. Certaines analyses permettent déjà d'écarter certaines hypothèses de structures dimoléculaires, mais pas encore pour tous les systèmes multiquarks observés. De nouvelles données, au LHC en particulier, et de nouveaux outils d'analyse devraient dans un futur proche permettre de lever ces incertitudes et de répondre clairement à la question: a-t-on bien observé des pentaquarks et des tétraquarks?

Une autre interrogation émerge de ces découvertes. Le point commun de tous les candidats tétraquarks ou pentaquarks observés est la présence de quarks *c*. Aucune structure exotique ne contenant que les trois quarks les plus légers (u, d, s) n'a été mise en évidence. Comment l'expliquer? Aujourd'hui, les physiciens ne peuvent qu'émettre des hypothèses. Les quarks *c* lourds tendraient à stabiliser d'une façon ou d'une autre ces systèmes multiquarks. D'après la chromodynamique quantique, les interactions des quarks ne dépendent pas de leur masse. Il est donc étonnant de voir un tel effet du quark *c*. Les pentaquarks et les tétraquarks nous disent-ils quelque chose de nouveau sur l'interaction forte? L'avenir nous le dira.

Des pentaquarks encore plus lourds à découvrir

L'étude des multiquarks est loin d'être achevée. Par exemple, il pourrait exister des pentaquarks formés avec des quarks *b*, trois fois plus lourds que les quarks *c*. On trouvera peut-être de telles particules dans les données les plus récentes du LHC. Les physiciens imaginent aussi trouver des pentaquarks contenant seulement un quark lourd *c* ou *b* et non des paires quark-antiquark. Le LHC n'est pas seul dans ce projet, de nombreuses autres installations dans le monde, notamment le laboratoire américain Jefferson, étudient ces systèmes multiquarks ou ont pour projet de les étudier. L'enjeu est une meilleure compréhension de la chromodynamique quantique et de l'interaction forte, l'une des quatre forces fondamentales à l'œuvre dans la nature. ■

BIBLIOGRAPHIE

Collaboration *LHCb*, *Amplitude analysis of $B^+ \rightarrow J/\psi \phi K^+$ decays*, soumis à *Phys. Rev. D*, 2016.

Collaboration *LHCb*, *Observation of $J/\psi \phi$ resonances consistent with pentaquark states in $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi K^- p$ decays*, *Physical Review Letters*, vol. 115, 072001, 2015.

M. Gell-Mann, *A schematic model of baryons and mesons*, *Physics Letters*, vol. 8, pp. 214-215, 1964.

G. Zweig, *An $SU(3)$ model for strong interaction symmetry and its breaking*, CERN-TH-401, Preprint CERN Library, 1964.

Deux nouveautés pour les amoureux des mathématiques !

Mathématiques et Mystères

De Jean-Paul Delahaye

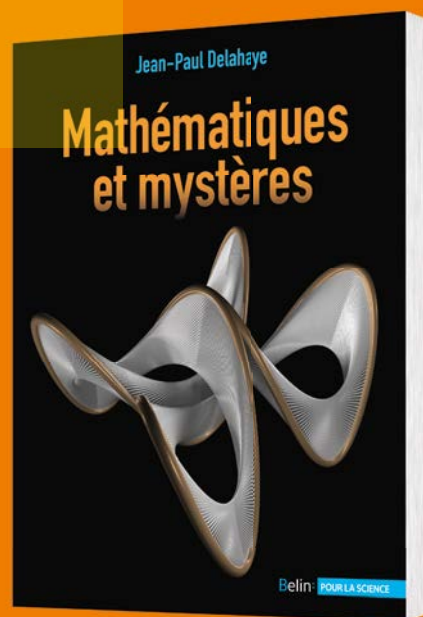
Conjectures, paradoxes, objets ou situations aux propriétés bizarres... Les mathématiciens explorent des sujets aussi passionnants que déconcertants.

En partenariat avec **POUR LA SCIENCE**

Derniers livres parus du même auteur :

Merveilleux nombres premiers

La logique, un aiguillon pour la pensée



18,5 x 24,5 cm - 224 pages - 25 €



15 x 22 cm - 224 pages - 19 €

Le choix du meilleur urinoir

Et 19 autres problèmes amusants qui prouvent que les maths servent à quelque chose !

De Jérôme Cottanceau

Des réponses avec un brin de mauvaise foi et beaucoup de second degré, mais accessible à tous, à LA grande question : mais à quoi ça sert, les maths ?

LA référence pour décrypter l'arbre du vivant, entièrement actualisé !

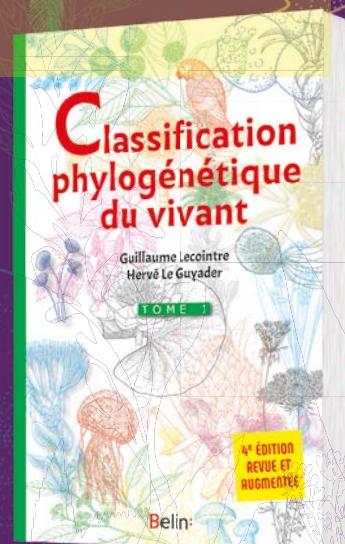
La classification phylogénétique du vivant

Tome 1 - 4^e édition

De Guillaume Lecointre et Hervé Le Guyader

Cette nouvelle édition d'un livre devenu une référence, véritable incursion dans l'arbre du vivant, a été profondément remaniée et actualisée. Ce tome 1 compte 13 arbres, des bactéries aux angiospermes.

Tome 2 à paraître en 2017 : en 16 arbres, l'ensemble des animaux (métazoaires).



18 x 28 cm - 584 pages - 43 €

Belin:

Inscrivez-vous à la newsletter sciences sur
editions-belin.com

Ces démangeaisons qui nous rendent fous

Stephani Sutherland

Piqûre d'insecte, eczéma, urticaire, allergie... : les démangeaisons associées peuvent nous amener à nous gratter jusqu'au sang. Les mécanismes physiologiques en jeu se dévoilent et révèlent des liens avec ceux de la douleur.

Au début, ce n'était qu'une petite rougeur sur le mollet de Nicole Burwell, une femme de quarante ans. Elle était apparue à la fin d'un voyage à Las Vegas avec son fiancé, vers la fin de l'été 2010. «Ce petit point rouge sur ma jambe me démangeait énormément, mais ça ne ressemblait pas à une piqûre de moustique. Il n'y avait pas de papule, pas de saillie», explique-t-elle. Elle prit alors un antihistaminique, de la diphénhydramine disponible sans ordonnance, et dormit pendant les quatre heures du trajet en voiture pour rentrer à Claremont, en Californie. Au réveil, la démangeaison était toujours là. Au cours de la semaine suivante, la rougeur s'est amplifiée, tout comme la démangeaison.

Nicole est donc allée consulter son médecin. L'éruption s'était alors étendue aux deux jambes. Les trois années suivantes, Nicole a lutté contre une éruption pénible qui se déplaçait sur son corps, couvrant les bras et les jambes, les mains, le torse et le dos. Ce n'était pas beau à voir, mais le plus gênant, c'était les démangeaisons.

«J'étais anéantie. Je ne pouvais pas rester assise tranquillement ; je n'arrivais à me concentrer sur rien. J'en devenais folle !», explique Nicole. Elle a mis en place une routine quotidienne. Après sa journée de travail, elle rentrait dans son appartement climatisé, se déshabillait, prenait deux comprimés de diphénhydramine et se préparait un mélange de bourbon et de Diet 7Up. «Je rentrais et je pleurais, tellement ça me démangeait». Nicole gardait des packs de glaçons sous la main afin de calmer les démangeaisons suffisamment pour pouvoir s'endormir.

Nicole Burwell n'est pas la seule : on estime que un quart des adultes souffriront de démangeaisons durant plus de six semaines au cours de leur vie. Les démangeaisons chroniques peuvent être dues à l'une des pathologies formant une longue liste : des maladies de la peau telles que l'eczéma ou le psoriasis, l'insuffisance rénale, une lésion nerveuse due à un herpès ou au diabète, des acariens creusant des galeries dans la peau, une réaction allergique à un

L'ESSENTIEL

- Des formes chroniques de démangeaison apparaissent souvent sans cause apparente.
- Une piqûre d'insecte ou une atteinte cutanée similaire amènent des cellules immunitaires à produire de l'histamine, un composé pouvant entraîner des démangeaisons intenses.
- L'identification de pruritogènes (substances induisant des démangeaisons) non histaminiques et une meilleure connaissance des liens entre démangeaison et douleur suscitent l'espoir de nouveaux traitements pour les cas tant aigus que chroniques.

© Brian Stauffer