

HOMO SAPIENS INFORMATICUS chronique de Gilles Dowek

Les ordinateurs, rois de la mise en abyme

Grâce à sa façon de mémoriser des données, la machine peut, au contraire d'un humain, utiliser des algorithmes récursifs.



Pour trier une liste de nombres par ordre croissant, un algorithme consiste à découper cette liste en deux plus petites et à les trier à leur tour en utilisant ce même algorithme. Une fois les deux petites listes triées, il ne reste plus qu'à les interclasser pour obtenir le résultat. Cet interclassement est une opération rapide, qui ne demande qu'une seule lecture des deux listes.

Cet algorithme assez simple à décrire est, pour les humains que nous sommes, difficile à utiliser. Essayez par exemple de trier la liste [9, 3, 6, 5, 4, 8, 1]. Il faut d'abord la découper en deux listes plus petites, [9, 3, 6, 5] et [4, 8, 1], puis les trier. Pour trier la première, il faut la découper en deux listes plus petites, [9, 3] et [6, 5], puis les trier. Pour trier la première, il faut la découper en deux listes plus petites, [9] et [3], et les trier. Ces listes ne comportant qu'un seul élément, elles sont déjà ordonnées. Il faut alors les interclasser, ce qui donne la liste [3, 9], puis... quelle est l'opération suivante déjà ?

Pour trier la liste [9, 3, 6, 5, 4, 8, 1], l'algorithme demande ainsi de trier la liste [9, 3, 6, 5], ce qui demande, etc. C'est une sorte de mise en abyme qui nous désoriente rapidement, comme ces histoires où des personnages racontent des histoires, où des personnages racontent des histoires, où... nous perdons vite le fil.

Cet algorithme est si difficile à utiliser que, quand nous devons trier une liste, nous préférons utiliser un ordinateur, ou alors utiliser « à la main » un autre algorithme, par exemple chercher le plus petit élément dans la liste, puis le deuxième, etc., théo-

riquement moins efficace, mais bien plus facile pour nous.

Le fait que l'algorithme de tri décrit plus haut soit difficile à utiliser pour les humains, mais facile pour les ordinateurs, révèle une différence essentielle entre le fonctionnement de notre cerveau et celui d'un ordinateur. Nous avons une capacité limitée à traiter les mises en abyme, car nous avons



L'ORDINATEUR GÈRE AVEC FACILITÉ des processus imbriqués les uns dans les autres comme des poupées russes.

une capacité limitée à mémoriser, sans les confondre, une histoire interrompue par le récit d'une autre histoire, interrompue par le récit d'une autre histoire, etc.

En revanche, une telle mémorisation ne pose aucune difficulté à un ordinateur, dont la mémoire comporte une « pile », qui sert précisément à ne pas perdre le fil dans un tel emboîtement. Ainsi, pour trier la liste [9, 3, 6, 5, 4, 8, 1], l'ordinateur la découpe en deux listes plus petites, [9, 3, 6, 5] et [4, 8, 1], met la seconde, [4, 8, 1], au sommet de la pile, puis découpe la première, [9, 3, 6, 5],

en deux listes plus petites, [9, 3], et [6, 5], met la seconde, [6, 5], au sommet de la pile, etc. Quand, après avoir trié et interclassé les listes [9] et [3], il lui faudra trier la liste [6, 5], il la retrouvera au sommet de la pile. Et ainsi de suite.

Notre difficulté à ne pas nous perdre lors d'une telle mise en abyme a donc une explication simple : à la différence d'un ordinateur, notre cerveau n'a pas de pile. Cette « infirmité » explique par exemple que nous n'aimions pas être interrompus. Ainsi, quand nous sommes en train de lire et qu'un appel téléphonique nous interrompt, il nous est difficile de mettre notre lecture au sommet de la pile, de répondre à l'appel, et de l'y récupérer ensuite au point où nous l'avions laissée. Si jamais, alors que nous sommes en train de répondre au téléphone, nous sommes interrompus à nouveau, c'est la catastrophe. L'absence de pile dans notre mémoire explique aussi comment les conteurs se jouent facilement de nous avec de telles mises en abyme et pourquoi, quand nous voulons nous exprimer clairement, nous avons tout intérêt à éviter les digressions et les propositions relatives emboîtées.

Ce handicap explique aussi que, à l'époque où nous n'avions pas d'ordinateurs, nous concevions parfois des algorithmes inutilement complexes, mais qui nous semblaient faciles à utiliser « à la main », car ils évitaient de telles mises en abyme. ■

Gilles DOWEK est chercheur à l'Inria et membre du conseil scientifique de la Société informatique de France.

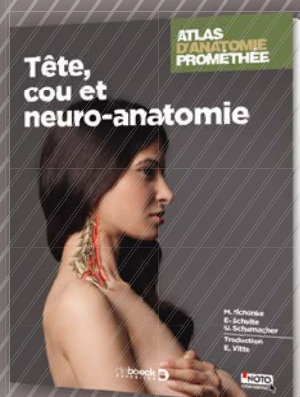
Tout le corps humain en 3 volumes

**ATLAS
D'ANATOMIE
PROMÉTHÉE**

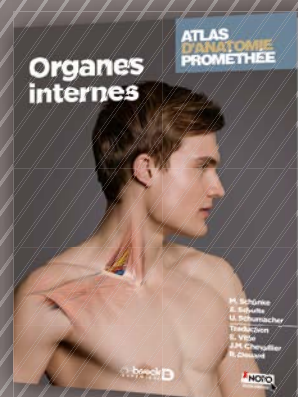
9782804185527 - 640 PAGES - 89€



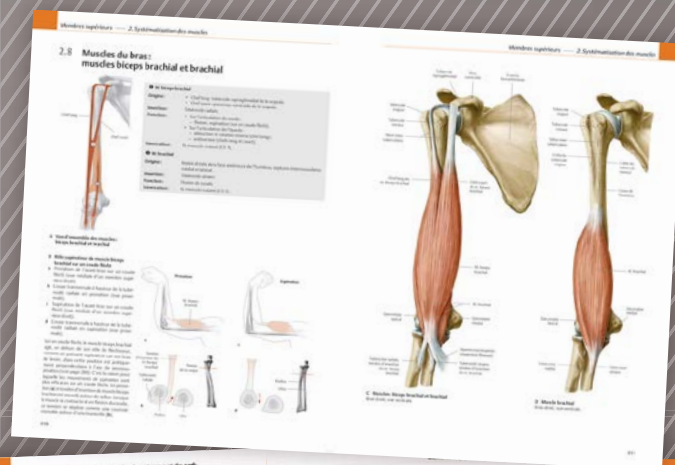
DÉCOUVREZ ÉGALEMENT :



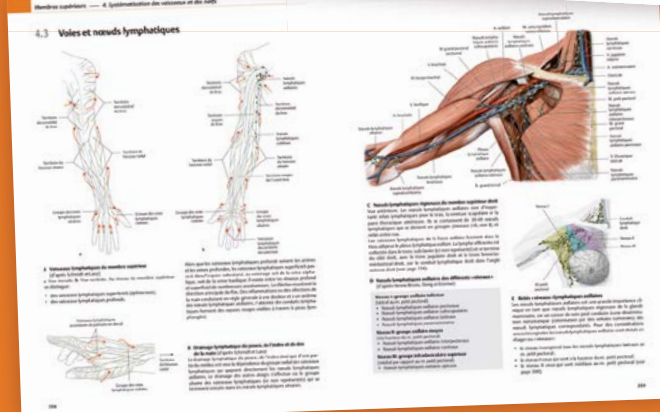
9782804186159 - 560 PAGES - 89€



9782804182984 - 520 PAGES - 89€



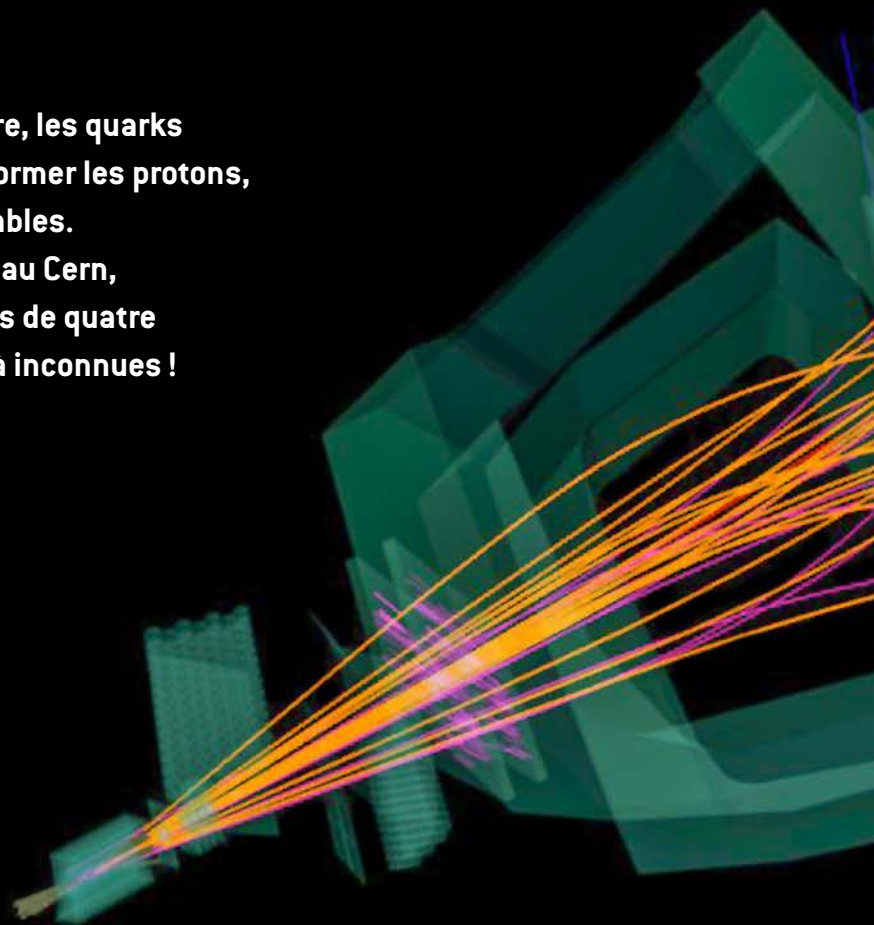
- Plus de **170 tableaux** par titre
- Près de **1800 illustrations** dans chaque tome
- Des **centaines d'exemples cliniques illustrés**
- Chaque sujet est exposé sur une **double page**, pour une **approche complète et rapide**, en un seul coup d'œil
- Des **images par ordinateur** hautes en couleur, d'une précision exceptionnelle, hyperréalistes



Des quarks aux pentaquarks

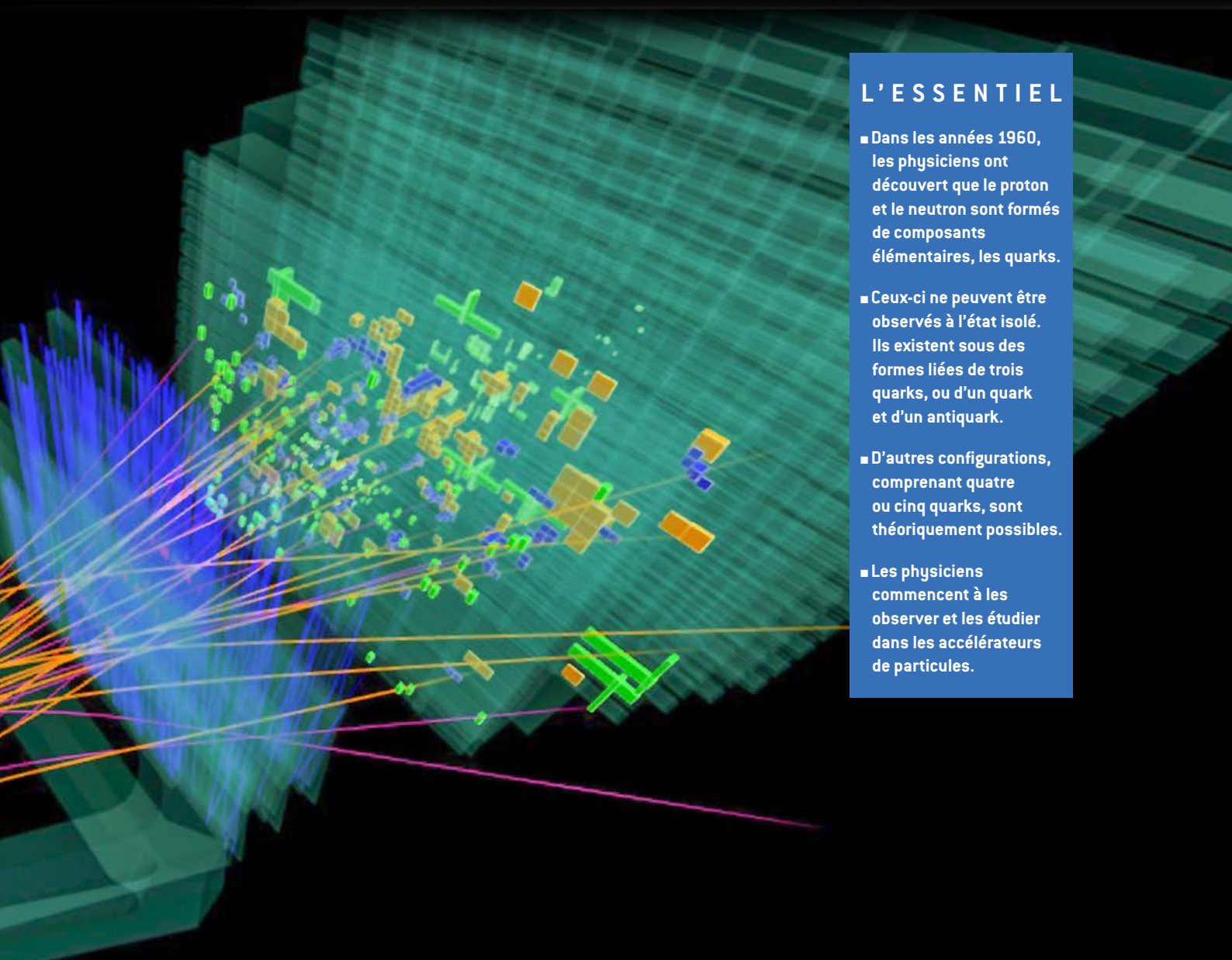
Georg Wolschin

Constituants fondamentaux de la matière, les quarks s'assemblent en duos ou en trios pour former les protons, les neutrons et d'autres particules instables. Or les collisions à haute énergie du LHC, au Cern, ont récemment produit des assemblages de quatre ou cinq quarks : des particules jusque-là inconnues !



FEU D'ARTIFICES DE PARTICULES. Les collisions de protons de haute énergie dans l'expérience *LHCb*, au Cern, produisent de nombreuses particules (dont les trajectoires sont représentées en rose et en orange). En analysant ce type d'événement, les physiciens ont découvert des particules exotiques composées de quatre ou cinq quarks.

© Collaboration LHCb, Cern



L'ESSENTIEL

- Dans les années 1960, les physiciens ont découvert que le proton et le neutron sont formés de composants élémentaires, les quarks.
- Ceux-ci ne peuvent être observés à l'état isolé. Ils existent sous des formes liées de trois quarks, ou d'un quark et d'un antiquark.
- D'autres configurations, comprenant quatre ou cinq quarks, sont théoriquement possibles.
- Les physiciens commencent à les observer et les étudier dans les accélérateurs de particules.

Saviez-vous qu'au LHC, le Grand collisionneur de hadrons du Cern, près de Genève, de nouvelles particules ont été mises en évidence en juillet 2015 et en juin 2016 ? Probablement pas. Ces découvertes ont fait beaucoup moins de bruit que celle du boson de Higgs en 2012 et pourtant, elles sont presque aussi importantes. La structure de ces particules est exotique et confirme les hypothèses faites dans les années 1960 concernant leur existence. Les mesures précises de leurs propriétés, effectuées dans le cadre de l'expérience

LHCb, ouvrent une nouvelle fenêtre sur le comportement de la matière aux échelles les plus infimes.

De quoi s'agit-il ? À l'échelle la plus fondamentale, la matière, à l'exception de l'électron et des particules apparentées, est composée de quarks. Ces constituants élémentaires s'associent par trois pour former le proton, le neutron – les composants du noyau atomique – et bien d'autres particules (les « baryons »). Il existe aussi des particules constituées d'un quark et d'un antiquark (les « mésons »). Mais en

existe-t-il d'autres ? Formées de quatre, cinq quarks, ou plus ? Depuis une dizaine d'années, des indices s'accumulaient en faveur de ces structures multiquarks. Les récentes découvertes au LHC le confirment : des tétraquarks et des pentaquarks peuvent se former dans la nature.

Pour comprendre les enjeux de ces découvertes, il faut remonter au début des années 1960. Les physiciens étaient confrontés à un problème. Plusieurs années auparavant, grâce à des expériences de collisions, ils avaient découvert une multitude

■ L'AUTEUR



Georg WOLSCHIN est professeur à l'Institut de physique théorique de l'université de Heidelberg, en Allemagne.

de particules. Ce zoo était au début très confus, mais les théoriciens sont parvenus à l'ordonner à l'aide de la théorie mathématique des groupes de symétrie. Ces travaux suggéraient que la plupart des particules alors connues n'étaient pas des particules élémentaires, mais qu'elles étaient formées d'un petit nombre de constituants élémentaires. Lesquels ?

En 1964, deux théoriciens américains ont conçu, indépendamment l'un de l'autre, le modèle des quarks, selon lequel le proton et le neutron, par exemple, sont formés de trois particules ponctuelles. L'un d'eux, Murray Gell-Mann, à l'institut de technologie de Californie (Caltech), a nommé « quarks » ces particules élémentaires, en s'inspirant d'un extrait du roman *Finnegans Wake* de l'auteur irlandais James Joyce. De son côté, George Zweig, qui travaillait au Cern, a utilisé le terme d'« as » (*aces* en anglais), mais c'est l'expression proposée par Murray Gell-Mann qui a fini par s'imposer.

Le modèle suppose différentes sortes, ou « saveurs », de quarks, dont les premières sont le quark *up* (ou *u*), le quark *down* (ou *d*) et le quark *strange* (ou *s*). Plus tard, essentiellement pour expliquer les propriétés de particules nouvellement découvertes, se sont ajoutées trois variantes plus lourdes : les quarks *charm* (ou *c*), *bottom* (ou *b*) et *top* (ou *t*).

Les quarks sont caractérisés par des « nombres quantiques » tels qu'un spin (moment cinétique intrinsèque) égal à $1/2$ dans les unités usuelles, une charge électrique fractionnaire ($+2/3$ ou $-1/3$ de la charge de l'électron), ainsi qu'une « couleur » pouvant prendre trois valeurs nommées « rouge », « vert », et « bleu » (propriétés qui n'ont cependant rien à voir avec la notion habituelle de couleur, liée à la longueur d'onde de la lumière). Il existe aussi des antiquarks, de même masse que leur quark associé, mais ayant une charge électrique opposée et une « anticouleur ».

Les quarks s'attirent entre eux par une force fondamentale, l'interaction forte. Celle-ci est réalisée par un échange de particules électriquement neutres, mais porteuses d'une charge de couleur, nommées gluons. Ces derniers sont de masse nulle, comme les photons médiateurs de l'interaction électromagnétique. Les spécificités de l'interaction forte sont décrites

par une théorie quantique des champs, la chromodynamique quantique.

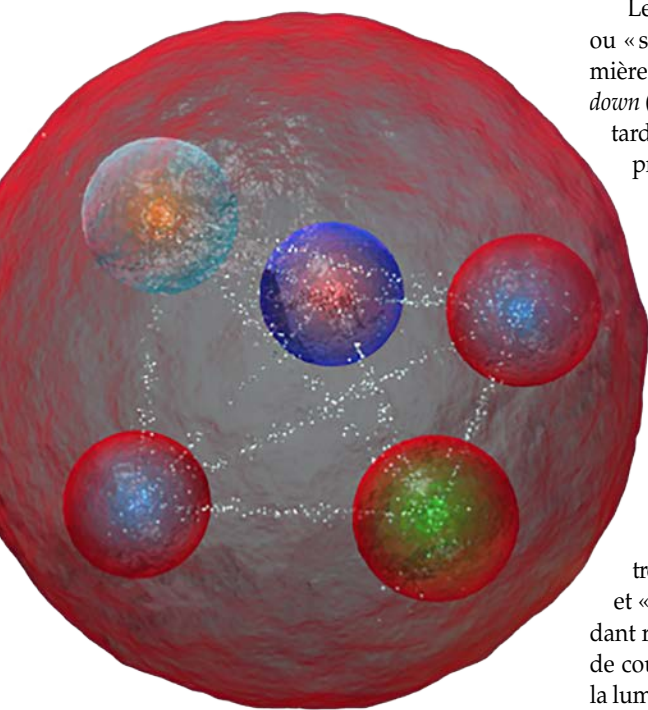
Cette théorie, proposée en 1973 par les Américains David Politzer, Frank Wilczek et David Gross, stipule que les quarks ne peuvent exister isolément, sauf dans des conditions extrêmes de température et de pression qui régnaient au tout début de l'Univers – environ dix microsecondes après le Big Bang. La matière était alors sous la forme d'une mer de quarks et de gluons libres, un « plasma quarks-gluons ». Des collisions d'ions de haute énergie dans les accélérateurs de particules permettent aujourd'hui de reproduire ces conditions particulières pendant une fraction de seconde. Mais en dehors de ces situations, les quarks s'associent spontanément pour former des structures – des « hadrons » – de telle façon que la « somme » des couleurs de leurs quarks produise une charge globale de couleur neutre (voir l'illustration page 24, en bas).

Cette règle de couleur neutre implique que l'on peut avoir des baryons, composés de trois quarks (portant chacun une des trois couleurs possibles), tels que les neutrons (*ddu*) et les protons (*uud*), et des mésons, constitués d'un quark et d'un antiquark de saveurs différentes (portant une couleur et l'anticouleur associée, rouge et antirouge par exemple), tels que les pions, kaons, etc.

Sous le proton, la mer de quarks

Cette description des hadrons est cependant incomplète. Aux quarks ci-dessus, dits de valence, il faut ajouter une « mer de quarks ». D'après la physique quantique, le vide est le siège d'un phénomène étonnant : la naissance à des instants aléatoires de paires particule-antiparticule qui s'annihilent et disparaissent aussitôt. Au cœur des hadrons, il en va de même : des paires quark-antiquark se créent et disparaissent presque immédiatement. Cette mer de quarks ne détermine pas les nombres quantiques (spin, charge) des hadrons, mais influe sur leur masse et certaines autres propriétés.

Dans les années 1960, le concept de quark n'allait pas du tout de soi. L'influent Murray Gell-Mann avait certes réussi à faire une place à son modèle, mais celui-ci n'était pas encore fermement admis par les physiciens. D'ailleurs, il obtint le prix Nobel de physique en 1969 pour ses « contributions et découvertes concernant



TROIS QUARKS PEUVENT SE LIER et former ainsi un baryon, type de particules dont les plus légères sont le proton et le neutron. Par ailleurs, un quark peut se lier à un antiquark et former ainsi un méson, type de particule instable qui comprend notamment les pions et les kaons. On ne connaissait pas d'autres états liés de quarks. En 2015, le premier pentaquark, formé de quatre quarks et d'un antiquark, a été mis en évidence au LHC (*Large Hadron Collider*, ou Grand collisionneur de hadrons).

la classification des particules élémentaires et leurs interactions», mais pas spécifiquement pour l'idée des quarks. Cela explique probablement pourquoi le comité Nobel n'a pas également honoré George Zweig cette année-là.

En réalité, Murray Gell-Mann, au début, ne croyait pas à l'existence physique des quarks. Il les voyait plutôt comme des artifices de calcul. À l'inverse, George Zweig était convaincu dès le début que les quarks avaient une réalité physique, et il proposa de les rechercher expérimentalement. Mais le fait que les quarks ne peuvent exister de façon isolée hors des hadrons était un obstacle à leur détection.

Dans la seconde moitié des années 1960, les théoriciens James Bjorken et Richard Feynman ont esquissé un moyen de mettre en évidence les quarks : en bombardant des protons avec des électrons très énergétiques, les physiciens pouvaient sonder la structure interne des premiers.

Cette idée a été mise en œuvre au SLAC, le centre de l'accélérateur linéaire de Stanford, aux États-Unis. Les chercheurs ont étudié la diffusion d'électrons ayant une énergie de plus de 7 gigaélectronvolts (GeV) et dirigés contre une cible constituée d'hydrogène liquide. De façon analogue aux célèbres expériences de diffusion de noyaux d'hélium (issus de la radioactivité α) par une feuille d'or menées au début du XX^e siècle par Ernest Rutherford, qui avaient permis de comprendre que l'atome est formé d'un tout petit noyau autour duquel des électrons sont en orbite relativement lointaine, les expériences de 1969 ont mis en évidence que le proton contient des constituants chargés et au moins 100 000 fois plus petits que le proton, que l'on a dénommés « partons ».

Des propriétés essentielles de ces partons concordaient avec celles des quarks. Ces derniers étaient donc bien réels. On constata aussi une propriété contre-intuitive : l'interaction forte est d'autant plus faible que l'on s'introduit davantage en profondeur dans le proton. Plus précisément, si l'on rapproche beaucoup deux quarks l'un de l'autre, la force (non électromagnétique) qui les lie devient nulle. C'est la « liberté asymptotique », une propriété fondamentale dont rend compte la chromodynamique quantique.

Des indices expérimentaux de l'existence des gluons ont été obtenus ensuite au synchrotron allemand DESY, près de

Un quatuor de tétraquarks découvert à LHCb

En juin 2016, les membres de la collaboration *LHCb* ont annoncé avoir détecté quatre tétraquarks, bien que la recherche de telles particules exotiques ne soit pas l'objectif principal du complexe expérimental *LHCb*.

L'expérience *LHCb* a été conçue à la fin des années 1990 pour étudier la différence de comportement entre particules et antiparticules. Les premières données ont été collectées en 2010. Installée auprès du LHC, l'anneau de collisions proton-proton au Cern, cette expérience compare surtout l'évolution au cours du temps des mésons contenant un quark *b* ou un quark *c* et celle de leurs antimésons. Il s'agit de mesurer des différences de propriétés entre la matière et l'antimatière, et en particulier d'étudier ce que les physiciens nomment la violation de la symétrie CP. L'asymétrie entre la matière et l'antimatière expliquerait en particulier pourquoi l'Univers contient de la matière et pas d'antimatière.

L'expérience *LHCb* permet aussi d'étudier avec précision les interactions des quarks et expliquera peut-être pourquoi les amplitudes de ces interactions varient, selon les saveurs des quarks en jeu, d'environ trois ordres de grandeur.

Le dispositif offre aussi la possibilité de mettre en évidence de nouvelles particules qui ne sont pas prédites par le modèle standard de la physique des particules.

Les collisions proton-proton engendrent un très grand nombre de particules instables telles que le méson K^+ ou le méson B^+

(comme ce dernier contient un quark *b*, il est nommé méson beau), mais aussi des baryons beaux. L'expérience *LHCb* permet d'isoler les mésons et les baryons beaux, d'identifier leurs produits de désintégration et de mesurer avec précision leurs propriétés cinématiques. Grâce à ce dispositif complexe, constitué de nombreux détecteurs, il est possible de rechercher dans la désintégration de mésons beaux des états exotiques tels que les tétraquarks et les pentaquarks, et de sonder du même coup le modèle des quarks.

En juin 2016, la collaboration *LHCb* a confirmé l'existence du tétraquark noté $X(4140)$. La découverte de cette particule avait été annoncée en 2009 par la collaboration *CDF*, à l'accélérateur Tevatron du Fermilab, aux États-Unis, puis confirmée par une seconde analyse de *CDF* et par les collaborations *CMS*, au LHC, et *D0*, au Tevatron. Mais le spin et la parité de cet état exotique étaient restés inconnus.

La collaboration *LHCb* ajoute à ce tétraquark trois autres, notés $X(4274)$, $X(4500)$ et $X(4700)$. Les quatre tétraquarks ont été détectés dans les désintégrations d'un méson B^+ dont les produits finaux sont les trois mésons J/ψ , ϕ et K^+ . Le tétraquark formé dans ce processus se désintègre rapidement pour donner les mésons J/ψ et ϕ

observés. Les nouvelles particules ont toutes la même composition en quarks ($c\bar{c}s\bar{s}$), mais sont de masses différentes.

Pour mener ces recherches, les physiciens ont analysé l'ensemble des données collectées entre 2010 et 2012. Ils ont notamment reconstruit les distributions de masse des sous-systèmes J/ψ et ϕ , d'une part, et de K^+ et ϕ , d'autre part (nombre d'événements observés en fonction de la masse du sous-système). Ces distributions sont ensuite interprétées en fonction de toutes les résonances (particules de courte durée de vie produites lors d'une désintégration) connues. En comparant les données aux calculs, les physiciens de *LHCb* ont conclu que de nouvelles particules étaient bien produites dans la désintégration du méson B^+ et ils ont pu déterminer leur spin et leur parité.

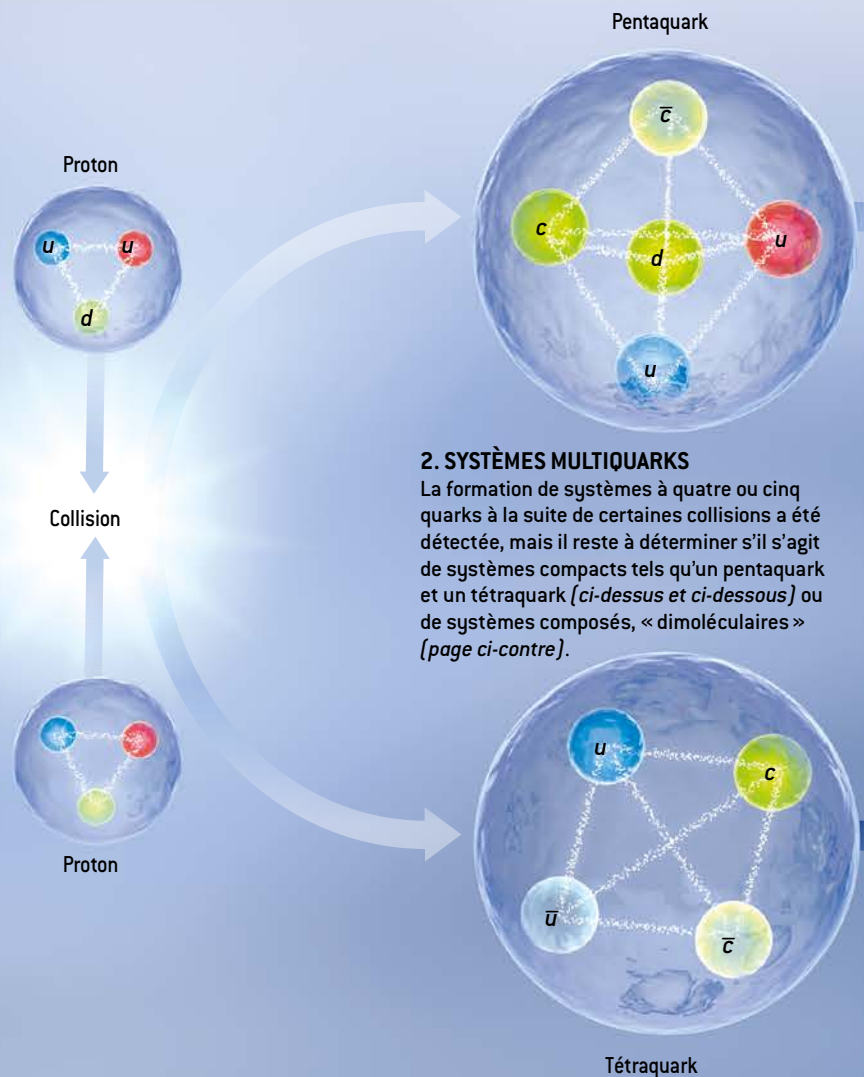
Ces quatre particules sont intéressantes, car il s'agit des seules structures connues de quatre quarks ne contenant ni quark *u* ni quark *d*, les quarks les plus légers dont est formée la matière ordinaire. La nature de ces particules pose encore question : s'agit-il de véritables tétraquarks, c'est-à-dire d'états liés de quatre quarks ($c\bar{c}s\bar{s}$), ou de « molécules » $D_s^+ D_s^-$, associant deux mésons $c\bar{s}$ et $\bar{c}s$? Il faudra attendre les données de la seconde phase d'exploitation du LHC, de 2015 à 2018, pour mieux comprendre leur structure.

– Renaud Le Gac
Centre de physique des
particules de Marseille (CPPM)

COMMENT LES TÉTRAQUARKS ET LES PENTAQUARKS SONT PRODUITS

1. COLLISION

Au collisionneur LHC du Cern, près de Genève, les physiciens accélèrent des protons dans un anneau de 27 kilomètres de circonférence. La moitié des protons parcourent ce trajet à une vitesse proche de celle de la lumière dans un sens, et l'autre moitié dans le sens contraire. En quatre sites sur l'anneau, correspondant aux quatre grandes expériences, dont *LHCb*, les faisceaux de protons se croisent et créent des collisions proton-proton. L'énergie des collisions était de 7-8 téraélectronvolts (TeV) dans une première phase du LHC; elle est maintenant de 13 TeV. Ces collisions énergétiques produisent de nouvelles particules, parmi lesquelles peuvent émerger d'éphémères tétraquarks ou pentaquarks.



2. SYSTÈMES MULTIQUARKS

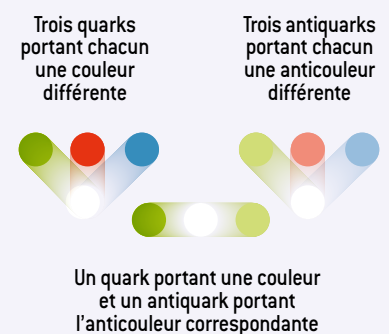
La formation de systèmes à quatre ou cinq quarks à la suite de certaines collisions a été détectée, mais il reste à déterminer s'il s'agit de systèmes compacts tels qu'un pentaquark et un tétraquark (*ci-dessus et ci-dessous*) ou de systèmes composés, « dimoléculaires » (*page ci-contre*).

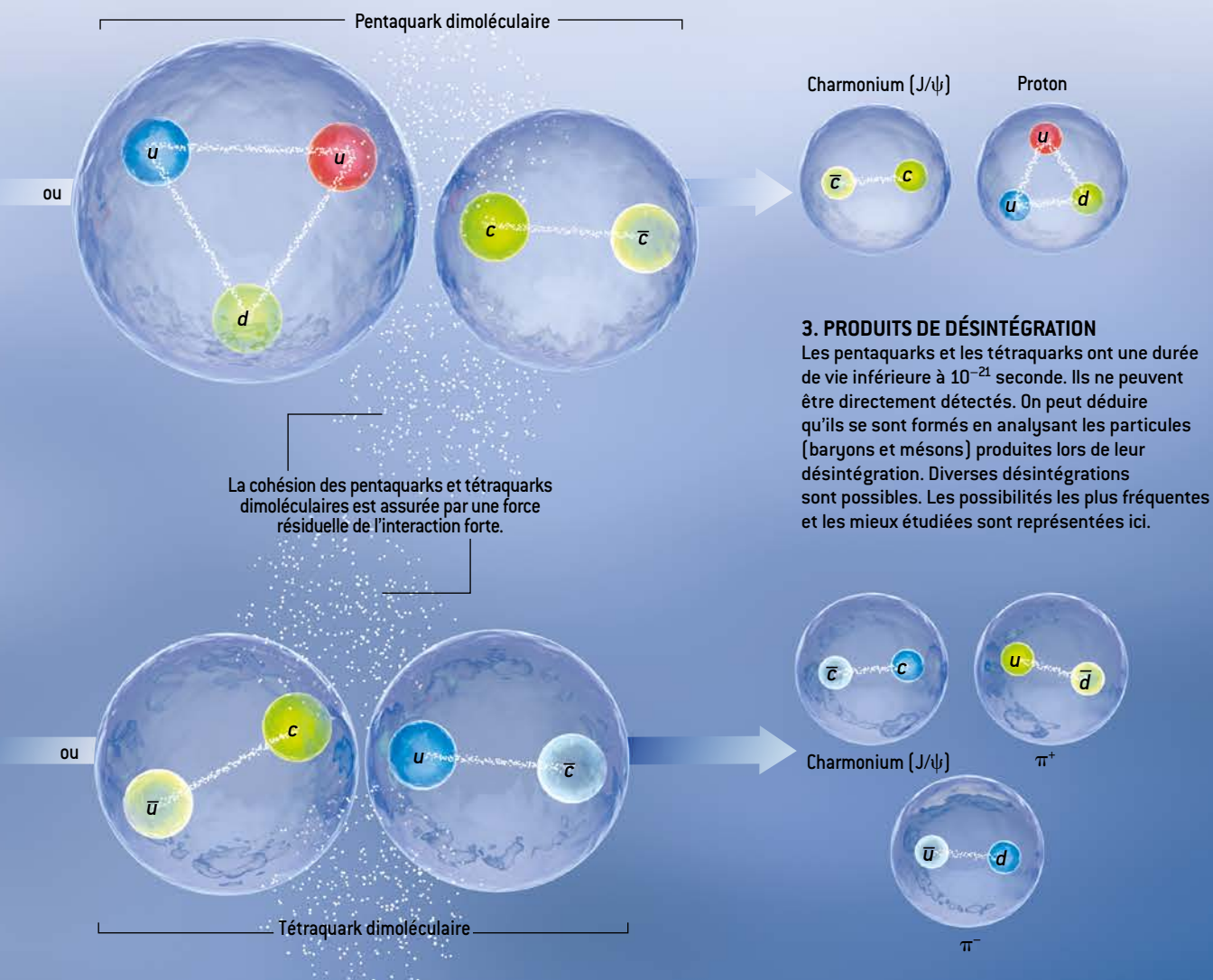
LES PRINCIPALES PROPRIÉTÉS DES QUARKS

Il existe six types ou « saveurs » de quarks, répartis en trois « générations ». Étant de spin 1/2, ce sont des fermions : deux quarks identiques ne peuvent pas être dans le même état quantique. Ces six particules élémentaires ont des masses différentes. Leur charge électrique est une fraction (1/3 ou 2/3) de la charge élémentaire e . Les quarks portent en outre une charge de « couleur », liée à l'interaction forte (tout comme la charge électrique est liée à l'interaction électromagnétique). Les médiateurs de cette force sont les gluons. La charge de couleur peut être le « rouge », le « bleu » et le « vert ». L'addition des trois couleurs ou l'addition d'une couleur et de son anticouleur donnent un résultat neutre, qui est le seul observable. Par ailleurs, pour chaque quark, il existe un antiquark, de mêmes propriétés mais avec des signes opposés.

Génération		Quark / Antiquark	Charge(e)	Masse(MeV)
1	up		+ 2/3	2,3
	anti-up		- 2/3	2,3
	down		- 1/3	4,8
	anti-down		+ 1/3	4,8
2	strange		- 1/3	95
	anti-strange		+ 1/3	95
	charm		+ 2/3	1 275
	anti-charm		- 2/3	1 275
3	bottom		- 1/3	4 180
	anti-bottom		+ 1/3	4 180
	top		+ 2/3	173 210
	anti-top		- 2/3	173 210

Selon les règles de la chromodynamique quantique, une particule portant une couleur, tel le quark, ne peut être isolée. Celui-ci se combine à d'autres pour former des assemblages neutres de couleur, dont les plus simples sont :

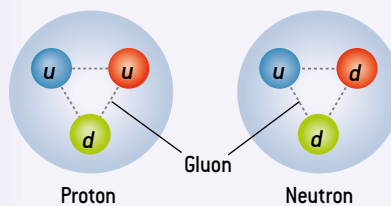




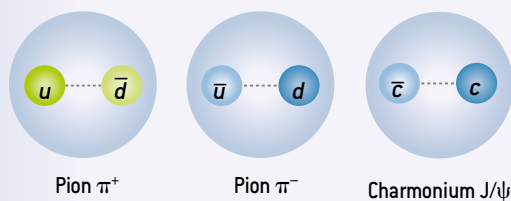
HADRONS

Les particules sensibles à l'interaction forte sont nommées hadrons et sont composées de quarks. Les baryons sont constitués de trois quarks. Les plus connus et les plus légers sont les constituants des noyaux atomiques : le proton (stable) et le neutron (dans un noyau atomique, il est stable, mais à l'état libre sa durée de vie est d'environ 880 secondes). Les autres baryons ont une durée de vie bien plus courte (10^{-8} seconde au plus). Il en est de même pour les mésons, particules formées d'un quark et d'un antiquark. Tant les baryons que les mésons peuvent provenir de toutes les combinaisons de quarks possibles. Ils doivent juste suivre les règles du jeu de la chromodynamique quantique et être de couleur totale neutre. Les quarks n'existent pas à l'état libre dans la nature car leur attraction mutuelle, due à l'interaction forte, augmente avec la distance qui les sépare.

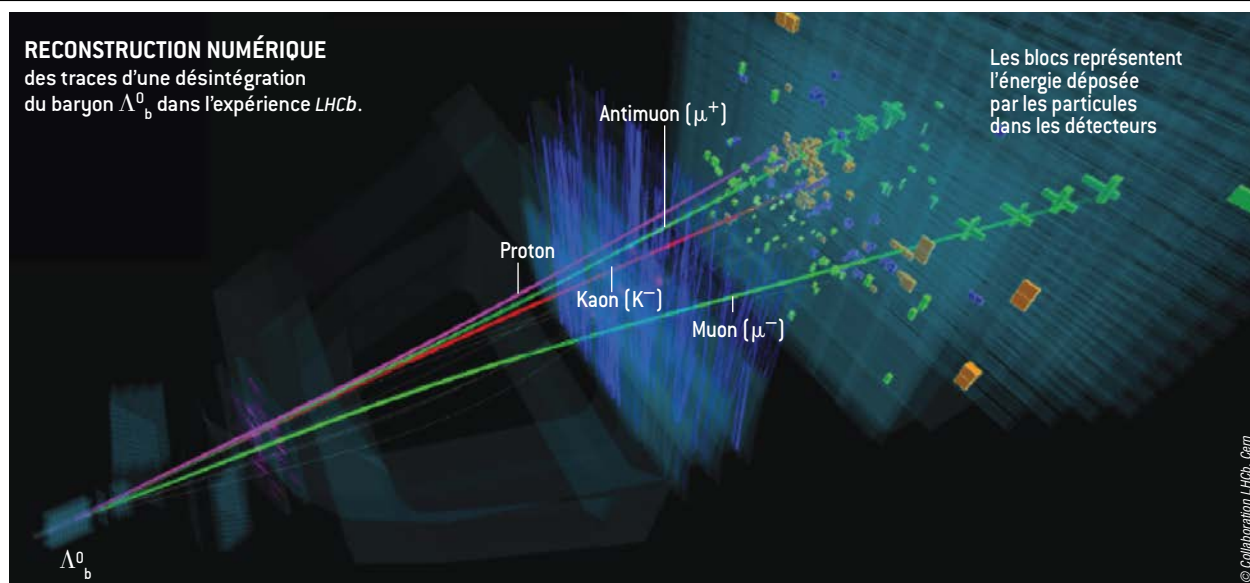
BARYONS



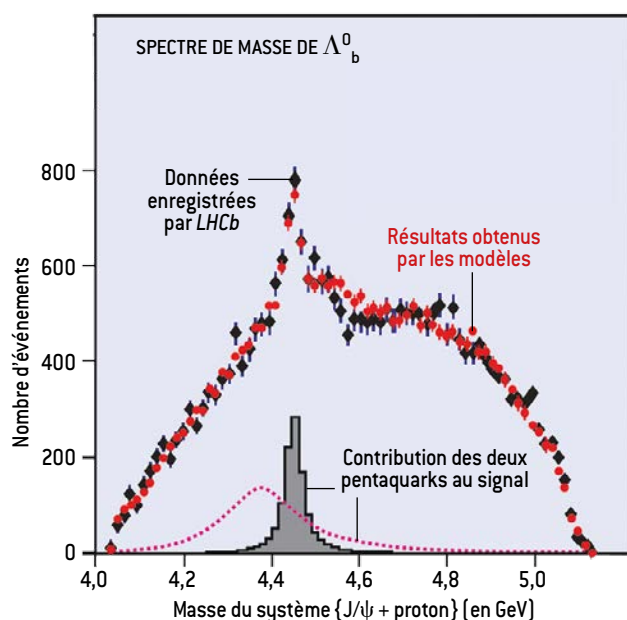
MÉSONS



RECONSTRUCTION NUMÉRIQUE des traces d'une désintégration du baryon Λ_b^0 dans l'expérience LHCb.



Les collisions proton-proton au LHC ont permis d'observer pour la première fois dans l'expérience *LHCb* la désintégration d'un baryon Λ_b^0 [composé de quarks u , d et b] en trois particules : un kaon K^- , un méson J/ψ [qui se désintègre très vite en deux muons de charges opposées] et un proton. Dans l'expérience *LHCb*, un champ magnétique dévie les particules en fonction de leur masse, leur énergie cinétique et leur charge électrique (*en haut*). Divers détecteurs enregistrent ces données pour permettre l'identification des particules. Le processus principal de désintégration du baryon Λ_b^0 suppose d'abord une désintégration en un méson J/ψ et un baryon instable Λ^* , qui se désintègre à son tour en un proton et un kaon. Une autre voie possible de désintégration est d'abord la formation d'un kaon et d'un pentaquark, qui se désintègre en un proton et un méson J/ψ . Pour vérifier que ce pentaquark se forme parfois, les physiciens étudient le nombre de désintégrations de Λ_b^0 en fonction de la masse du système J/ψ -proton détecté (*à droite*). En unités d'énergie, le pic, ou résonance, survient vers 4,45 gigaélectronvolts [GeV]. Il est compatible avec la formation de l'un ou l'autre de deux états pentaquarks ($uccud$, de charge +1) lors de la désintégration du baryon Λ_b^0 .



Hambourg, dans l'expérience *PETRA*. Lors de collisions électron-positron à haute énergie, les chercheurs produisaient des paires quark-antiquark, chaque particule s'échappant dans une direction différente. Or, comme un quark ne peut être ainsi isolé, l'énergie de la collision produisait un grand nombre d'autres quarks et d'antiquarks qui se combinaient avec les premiers pour former des hadrons. Dans les détecteurs, les chercheurs observaient donc deux jets de hadrons, chacun correspondant au quark ou à l'antiquark initial. Mais parfois, un troisième jet survenait – signe qu'une particule supplémentaire participait à la

réaction. Des analyses plus précises ont montré qu'il s'agissait d'un gluon.

Ainsi, les quarks se révélaient bien réels et s'associaient en duos ou en trios pour former respectivement les mésons et les baryons. Mais d'autres associations étaient-elles possibles ? Aussi bien George Zweig que Murray Gell-Mann avaient déjà prédit en 1964 la possibilité de systèmes constitués de quatre quarks (deux couples quark-antiquark) ou de cinq quarks (trois quarks et un couple quark-antiquark). En d'autres termes : des tétraquarks et des pentaquarks. Du point de vue théorique, ces systèmes multi-quarks sont tout à fait

compatibles avec le modèle standard de la physique des particules.

Les calculs théoriques indiquent que ces états ont une durée de vie très courte, inférieure à 10^{-21} seconde. Ils sont donc impossibles à détecter directement dans des expériences. Ils se désintègrent en d'autres particules moins éphémères, que les détecteurs sont en mesure d'enregistrer. À partir de l'angle de diffusion de ces particules, de leur énergie, etc., il est possible de déterminer si un tel système multi-quarks s'est formé et, si oui, d'en déduire certaines propriétés telles que sa masse, son spin et sa parité (c'est-à-dire

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 $uuudd\bar{s}$. 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.

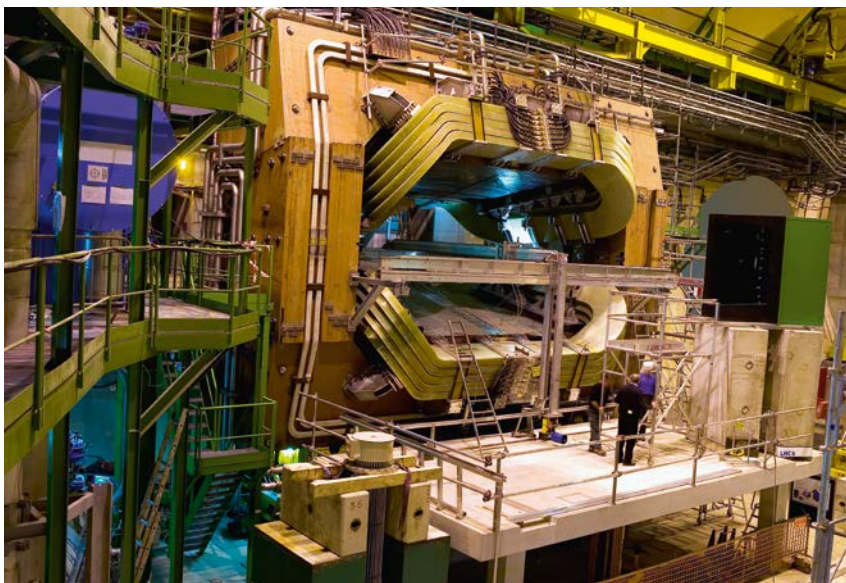
MÉSON

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

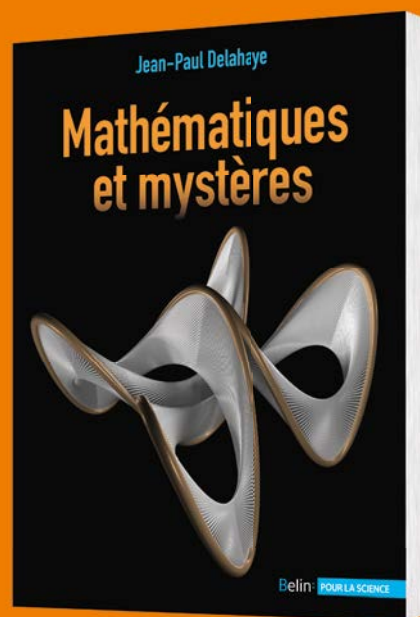
Conjectures, paradoxes, objets ou situations aux propriétés bizarres... Les mathématiciens explorent des sujets aussi passionnants que déconcertants.

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 !

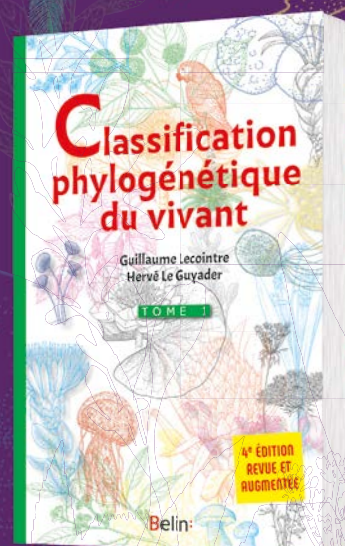
La classification phylogénétique du vivant

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