

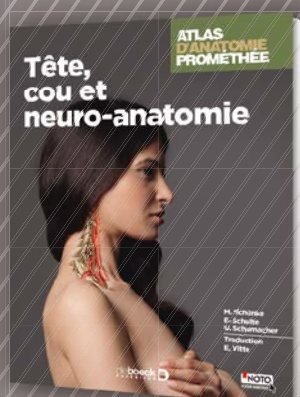
Tout le corps humain en 3 volumes

**ATLAS
D'ANATOMIE
PROMÉTHÉE**

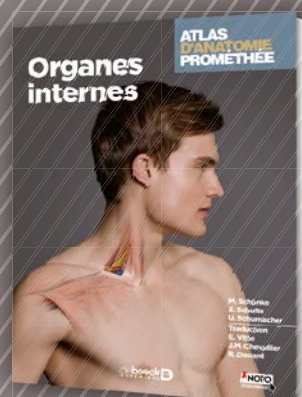
9782804185527 - 640 PAGES - 89€



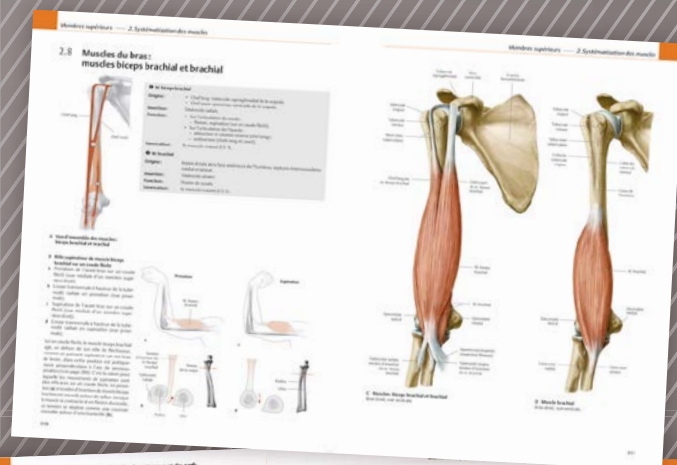
DÉCOUVREZ ÉGALEMENT :



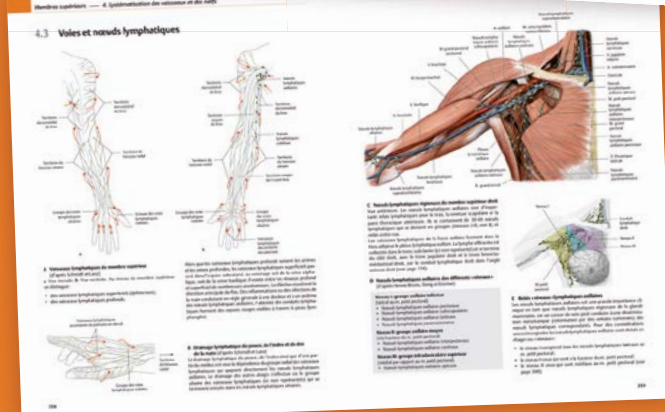
9782804186159 - 560 PAGES - 89€



9782804182984 - 520 PAGES - 89€



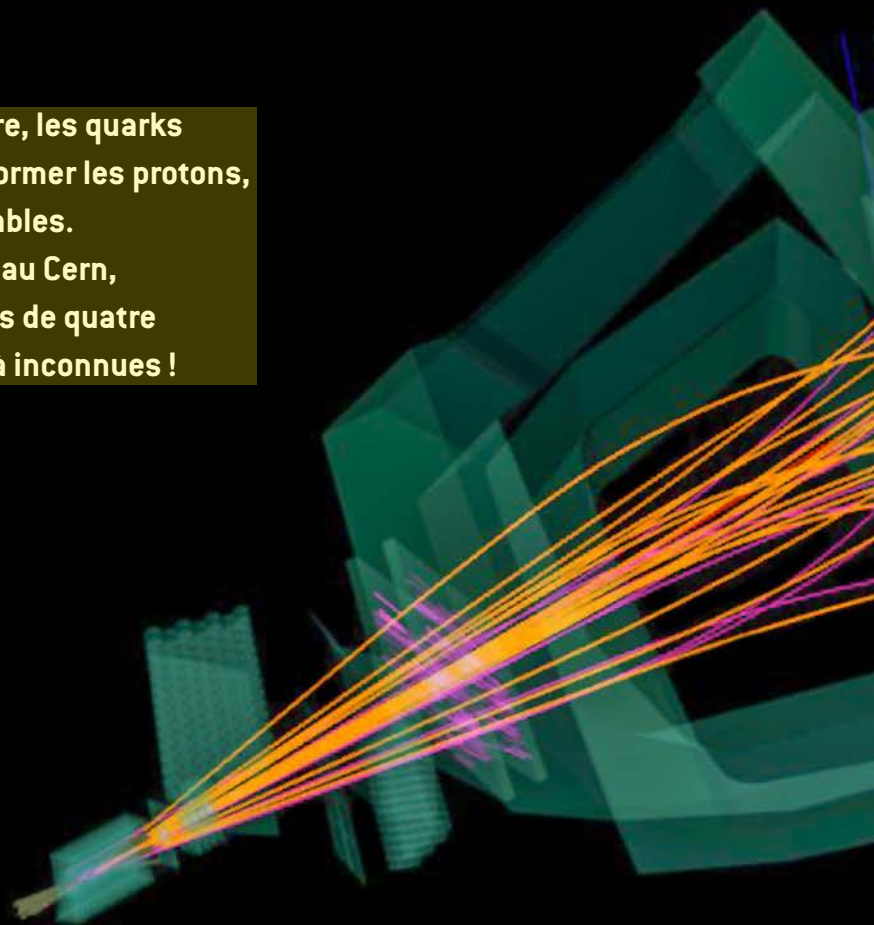
- Plus de **170 tableaux** par titre
- Près de **1800 illustrations** dans chaque tome
- Des **centaines d'exemples cliniques illustrés**
- Chaque sujet est exposé sur une **double page**, pour une **approche complète et rapide**, en un seul coup d'œil
- Des **images par ordinateur** hautes en couleur,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



Des quarks aux pentaquarks

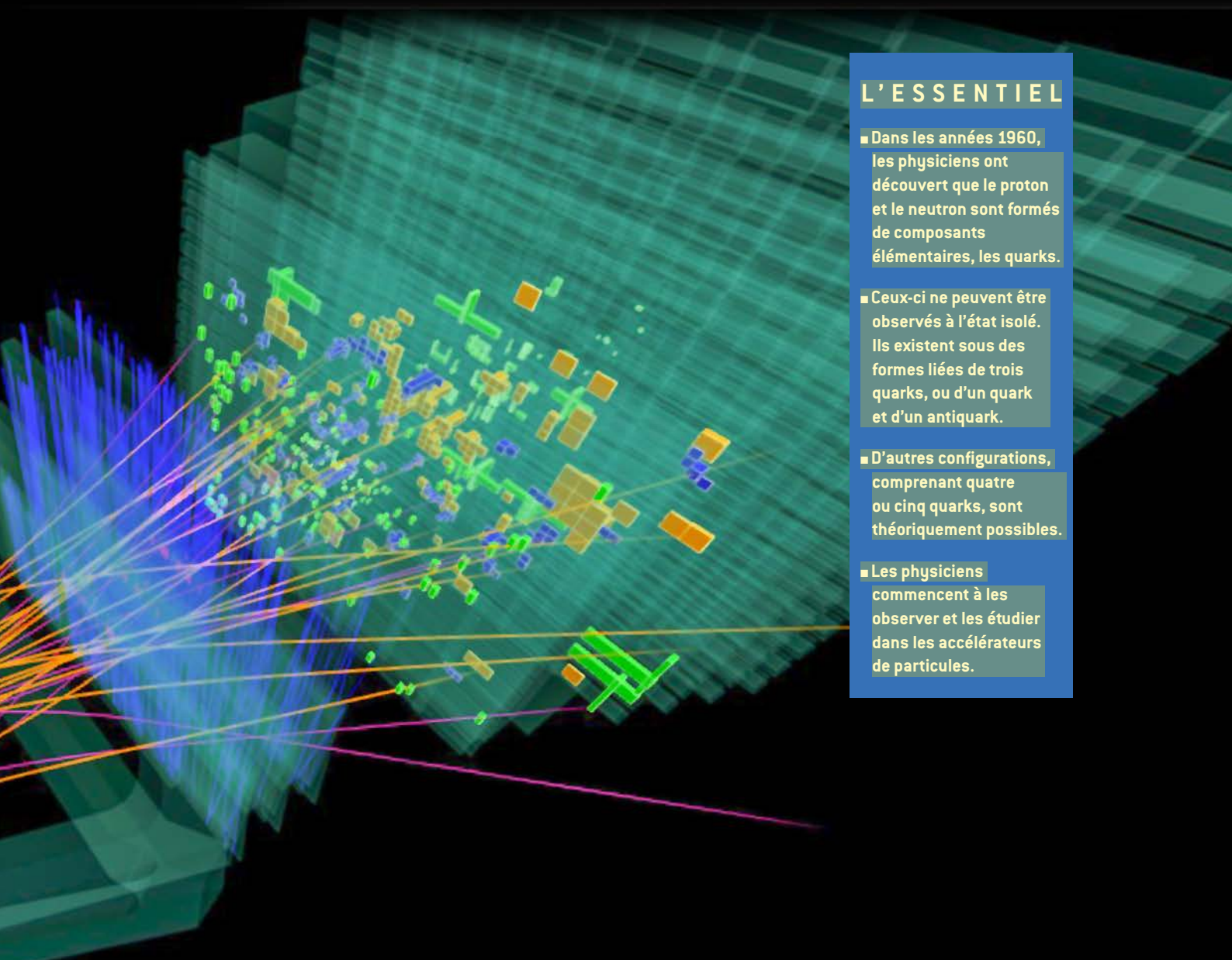
Georg Wolschin

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.

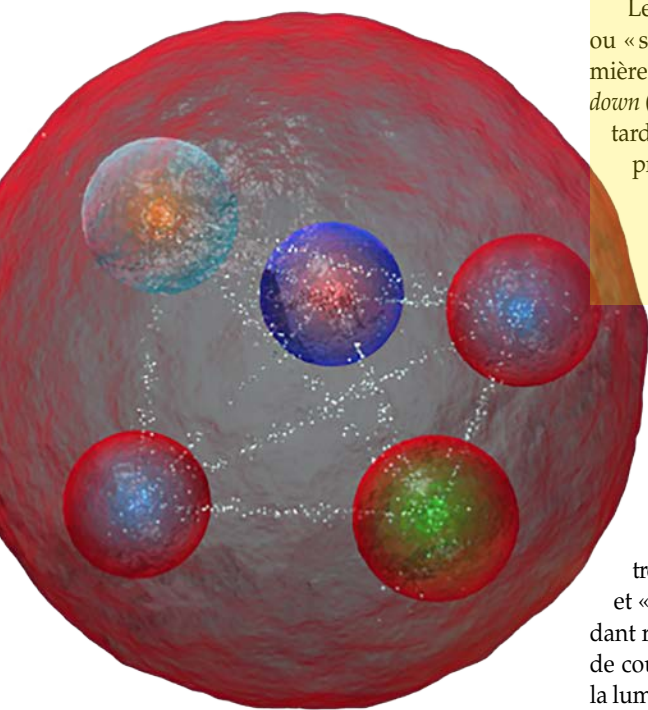
Cette théorie, proposée en 1973 par les Américains David Politzer, Frank Wilczek et David Gross, stipule que les quarks ne peuvent exister isolément, sauf dans des conditions extrêmes de température et de pression qui régnaient au tout début de l'Univers – environ dix microsecondes après le Big Bang. 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).