

«habillés» sont les seuls qui soient observables en pratique. Ainsi, l'électrodynamique quantique suppose des électrons infiniment petits, mais elle prédit aussi qu'ils ne peuvent être observés!

Quand les calculs mènent à un résultat infini

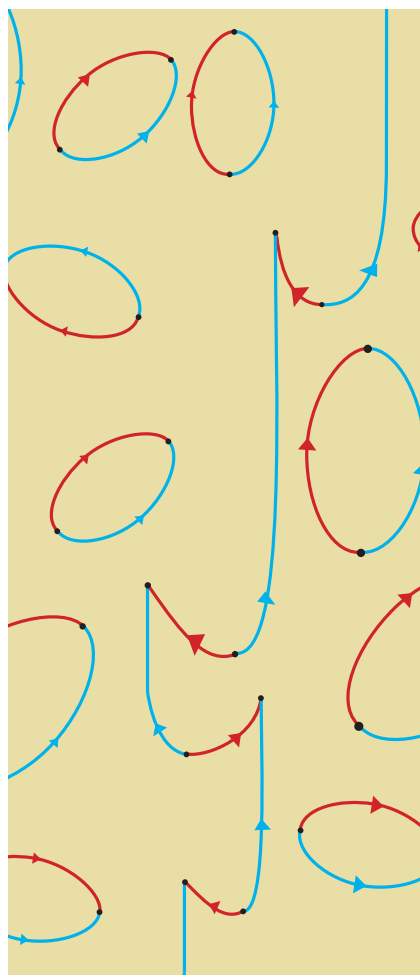
À la fin des années 1940, les physiciens ont calculé la charge de l'électron nu en prenant en compte les effets de la polarisation du vide. Ils ont eu une mauvaise surprise : les calculs mènent à un résultat infini. Ce n'est pas tout : par cette méthode, la masse de l'électron nu est également infinie! Manifestement, ces résultats absurdes sont engendrés par le caractère ponctuel, donc infiniment petit, de l'électron nu. Rappelons que l'équivalence entre l'énergie et la masse nécessite que le champ électrique d'un électron contribue à la masse, puisque la présence d'un champ électrique dans l'espace implique celle d'une densité d'énergie. Puisque, dans le cadre de l'électrodynamique quantique, l'électron est ponctuel, le champ électrique devient très intense aux très courtes distances (il varie comme l'inverse du carré de la distance). À tel point que les calculs le montrent, sa contribution à la masse est infinie.

L'électrodynamique quantique fondée sur l'hypothèse d'électrons nus ponctuels et en interaction locale aboutit à un paradoxe. Cette hypothèse est-elle erronée? L'électron nu présente-t-il une structure interne, laquelle ne devient perceptible que pour de très petites distances, 10^{-20} mètre par exemple. S'il en est ainsi, cette particule n'est pas infiniment petite, mais a un rayon fini. Les calculs montrent alors que les valeurs infinies disparaissent. Toutefois, malgré d'intenses efforts, les physiciens n'ont jamais décelé de preuve expérimentale de l'existence d'une sous-structure électronique. Seul résultat obtenu : si le rayon de l'électron n'est pas nul, il est nécessairement inférieur au centième de la taille des nucléons.

Dans les années 1950, la situation restait paradoxale. L'hypothèse de l'électron nu ponctuel faisait vaciller une théorie par ailleurs prometteuse. Certains des résultats obtenus étaient précis, d'autres infinis. La description globale des interactions électromagnétiques donnée par l'électrodynamique quantique était correcte. Les physiciens ont alors tenté de séparer

le bon grain de l'ivraie, c'est-à-dire d'éliminer les résultats infinis des calculs. Pour ce faire, ils ont ajusté la charge de l'électron habillé au résultat trouvé expérimentalement, en ignorant tout simplement la charge de l'électron nu. Ils firent de même pour la masse de l'électron habillé, imposant ainsi la masse mesurée. Nommée renormalisation, cette méthode est d'une étonnante efficacité : les quantités infinies sont éliminées et les résultats obtenus pour les grandeurs physiques mesurables sont les plus précises jamais obtenues.

L'un des pères de la renormalisation fut le physicien américain Richard Feyn-



5. LE VIDE aussi a une nature quantique, ce qui se manifeste notamment par la création permanente de paires particule-antiparticule. Constituées d'un électron et d'un positon, elles sont dites virtuelles parce qu'on ne peut les observer directement. Conséquence : un électron qui se propage à travers le vide s'annihile souvent avec un positon issu d'une paire virtuelle. Il semble alors réapparaître là où l'électron issu de la paire virtuelle se trouve et y poursuivre sa trajectoire. Son parcours apparaît donc flou à un observateur extérieur supposé assez petit pour l'examiner de près. Il s'agit là de l'une des manifestations de l'incertitude quantique sur la position.

mann. Lors d'un congrès aux États-Unis, il montra pour la première fois comment la méthode élimine les infinis qui apparaissent dans les calculs de la théorie de l'électrodynamique quantique. Ce progrès fit de l'électrodynamique quantique la plus précise des théories.

Les problèmes d'infinis dans les théories locales (interactions ponctuelles mettant en jeu des particules ponctuelles) se rencontrent dans d'autres théories que l'électrodynamique quantique. Ainsi, les interactions entre quarks sont décrites dans le cadre d'une théorie similaire à l'électrodynamique : la chromodynamique quantique. Cette théorie décrit l'interaction forte, laquelle provoque, notamment, l'assemblage des quarks par groupes de trois. Elle tire son nom du grec *chromos* qui signifie couleur, car on attribue aux quarks, par exemple au quark *u*, un nouveau type de charge, dénommée couleur, qui ne peut prendre que trois valeurs : rouge, vert ou bleu. Il y a ainsi un quark *u* rouge, un vert et un bleu, comme il y a des quarks *d* rouges, verts ou bleus. Le fait qu'il y ait trois couleurs signifie que les nucléons sont composés de trois quarks. Nous avons déjà souligné que les interactions entre quarks sont véhiculées par des particules d'énergie nommées gluons, les «médiateurs» de l'interaction forte (si intense qu'il est impossible de séparer les quarks). Pour observer les quarks et les gluons, les physiciens ont été obligés de recourir à des méthodes indirectes : ils les ont bombardés avec des particules insensibles aux interactions fortes, des électrons, des neutrinos ou des photons. L'existence des gluons a été prouvée pour la première fois au synchrotron allemand de Hambourg (DESY), à la fin des années 1970.

Pas de structure interne dans les quarks

Dans la théorie actuelle, les quarks et les électrons sont des particules élémentaires, c'est-à-dire qu'ils n'ont pas de structures internes. Comme dans le cas des électrons, les physiciens ont essayé de trouver une sous-structure pour les quarks, mais sans succès jusqu'à aujourd'hui. Une limite supérieure pour le rayon d'une éventuelle sous-structure de quarks a été obtenue au grand accélérateur de particules LEP du CERN, à Genève, mais aussi avec le synchrotron DESY et le

Tévatron, l'accélérateur du laboratoire américain Fermilab, à Chicago. Elle est du même ordre de grandeur que celle des électrons : 10^{-18} mètre.

L'électrodynamique et la chromodynamique constituent deux des trois pans de la théorie générale des particules acceptée aujourd'hui : le modèle standard. Cette théorie a fourni un cadre théorique cohérent, où l'on parvient à décrire toutes les interactions des particules élémentaires. Outre l'électron, il existe dans la nature cinq autres particules apparemment sans structure interne et qui ne sont pas soumises aux interactions fortes : le muon, le tau, le neutrino électronique, le neutrino muonique et le neutrino tau. Ce sont toutes des leptons ou des particules proches des leptons. L'électron est le plus léger des leptons électriquement chargés. Un autre lepton chargé est le muon, une sorte de gros électron dont la masse est environ 207 fois supérieure à celle de l'électron. Le tau est un lepton chargé dont la masse est 3 536 fois celle de l'électron. Le muon et le tau sont instables et se décomposent rapidement après leur production lors de collisions entre particules. Nous les avons déjà citées : trois particules électriquement neutres sont associées aux leptons chargés électriquement : les neutrinos (neutrino électronique, neutrino muon, neutrino tau). Dans le modèle standard, les neutrinos sont supposés sans masse (mais des expériences japonaises récentes leur en attribuent une). Il existe trois paires de leptons, chacune constituée d'une particule chargée et d'un neutrino.

Il existe six quarks différents

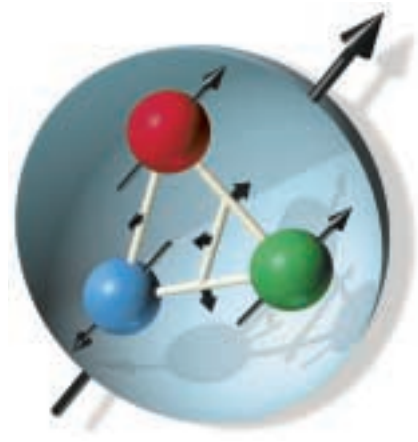
Si la chromodynamique quantique décrit la matière nucléaire (assemblage de nucléons) à partir des quarks *u* et *d*, il existe en fait quatre autres types de quarks. Ils sont désignés par les lettres *s* (quark étrange, *strange* en anglais), *c* (quark charme), *b* (pour *bottom*, qui signifie bas en anglais) et *t* (pour *top*, haut en anglais). Les physiciens les notent en général par paires de masses comparables. Les quarks (*c,s*) et (*t,b*) sont créés lors de la production de particules plus lourdes que les nucléons. À l'instar du muon ou du tau, ils sont instables, ce qui provoque la désintégration rapide des particules qu'ils constituent. La valeur de leurs masses laisse les physiciens perplexes : tandis que celle des quarks *u* et *d* sont quasi nulles, celle

du quark *t* est proche de la masse du noyau atomique de l'or. Un noyau qui contient pas moins de 197 nucléons ! On peut regrouper en trois paires les six leptons et quarks : si nous regroupons chaque paire de leptons avec une paire de quarks, nous obtenons trois familles lepton-quark. La première, la famille constituée par les quarks *u* et *d*, l'électron et son neutrino, contient tous les constituants de la matière atomique. Les quarks de la troisième famille *t* et *b*, et surtout le tau, sont les objets les plus lourds du modèle standard.

En fait, l'existence de l'interaction faible impose à elle seule le regroupe-



6. RICHARD FEYNMAN, l'un des pères de l'électrodynamique quantique. Il contribua à résoudre le problème des infinis qui apparaissent dans les calculs faits dans le cadre de cette théorie.



7. LE PROTON est constitué de trois quarks, lesquels peuvent prendre chacun trois «couleurs» : rouge, vert, bleu. Les flèches représentent les spins, les barres blanches, les échanges de gluons, les «particules collantes» qui maintiennent la cohésion des trois quarks du proton.

ment des leptons et des quarks par familles. Celle-ci est responsable de la désintégration radioactive (dite bêta) des noyaux atomiques. Comme les autres forces, l'interaction faible est due aussi à l'échange de particules médiatrices, les particules *W* et *Z*. À la différence des photons et des gluons de l'interaction forte, les particules médiatrices de l'interaction faible ont une masse élevée : près de 100 000 gigaélectronvolts (un gigaélectronvolt est égal à un milliard d'électronvolts). La force faible, véhiculée par les particules *W* agit à l'intérieur des paires de leptons et de quarks décrites. Lors de la désintégration radioactive d'un noyau atomique, par exemple, un quark *d* est changé en quark *u* ; un électron et un neutrino sont produits simultanément. Les interactions électromagnétiques faibles peuvent être réunies dans le cadre d'une théorie unifiée, appelée théorie des interactions électrofaibles. Le modèle standard actuel des particules élémentaires est donc la synthèse des théories des interactions électrofaibles et des interactions fortes.

Cette théorie décrit bien les particules de notre monde et leurs interactions (l'interaction gravitationnelle reste à part). Par cette théorie, on évalue bien les masses des principaux constituants de la matière, les nucléons d'après celles de leurs constituants. Ainsi, la masse du neutron et celle, identique du proton correspondent à la somme des masses de leurs quarks internes et de l'énergie cinétique des gluons qu'ils échangent (un nouvel exemple d'équivalence masse-énergie au sens d'Einstein).

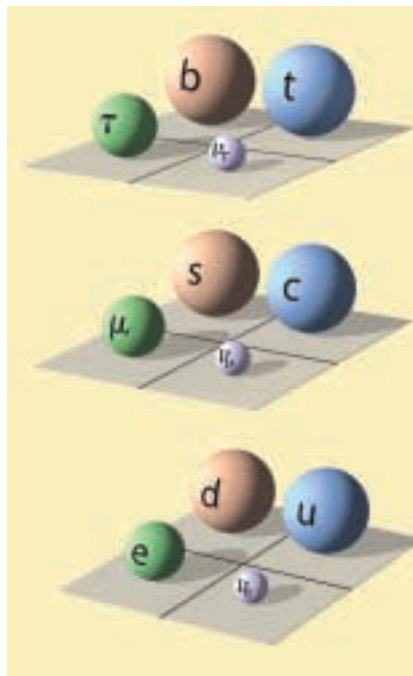
Reste une question ouverte : quelle est l'origine des masses des leptons et des quarks ? Malheureusement le modèle standard n'apporte pas de réponse. Pour les introduire dans la théorie en tant que paramètres, les physiciens font appel à un subterfuge : ils introduisent une particule hypothétique, dont l'unique fonction est de conférer leurs masses à ces particules. Il s'agit du boson de Higgs, une particule ainsi nommée d'après Peter Higgs, le théoricien qui la proposa. Le boson de Higgs a une masse si grande que les collisions hypothétiques qui pourraient le produire n'ont pu être réalisées. Toutefois, les énergies nécessaires seront disponibles dès que le grand accélérateur LHC du CERN, actuellement en construction, fonctionnera, dès 2005. On devrait alors savoir si le boson de Higgs existe ou si la masse des

constituants élémentaires a une autre origine.

Ainsi va la physique de l'infiniment petit. Au début du XX^e siècle, on a observé le spectre des états d'énergie de l'électron de l'hydrogène. Bien qu'il ait une structure simple, on ne sut l'expliquer avant l'avènement de la théorie quantique. Aujourd'hui, c'est le spectre des leptons et des quarks que les physiciens cherchent à expliquer. Dans cette science de l'infiniment petit, les progrès naissent le plus souvent d'expériences qui nous livrent de nouvelles structures simples, mais inattendues. Rien de ce genre ne s'est produit au cours des dernières années. Les arguments en faveur des leptons et des quarks du modèle standard sont-ils satisfaisants? Ces particules sont ponctuelles et représentent des singularités dans l'espace. Des particules infiniment petites peuvent-elles avoir une masse? Si oui, pourquoi la masse du muon est-elle 207 fois supérieure à celle de l'électron, bien que par ailleurs ces deux types de particules soient indiscernables. Peut-être serons-nous, un jour, contraints de renoncer au concept de particules ponctuelles. On peut supposer que les masses des leptons et des quarks résultent d'une sous-structure de ces particules, comme c'est le cas pour le proton. Peut-être obtiendra-t-on de nouveaux indices sur les constituants des leptons et des quarks grâce aux expériences futures réalisées dans les grands accélérateurs.

Perfectionner le modèle standard

Une autre raison incite les physiciens à perfectionner le modèle standard : ils voudraient ajouter la gravitation aux trois interactions – électromagnétique, faible et forte – qu'il décrit déjà. En fait, deux conceptions s'opposent : d'un côté, le modèle standard avec ses théories quantiques et ses interactions locales entre particules ponctuelles et, de l'autre, la relativité générale, où la gravitation résulte d'une déformation de l'espace-temps. Que faire? Considérer la relativité générale telle que nous la connaissons comme la théorie classique d'une théorie quantique, plus générale, la gravitation quantique (qui resterait à élaborer)? Une théorie quantique de la gravitation serait en même temps une théorie quantique de l'espace et du temps. Or, le modèle standard et la plupart des théories physiques sont bâties sur l'espace et sur le temps, et toute



8. LE MODÈLE STANDARD est la théorie la mieux acceptée par les physiciens des particules, lesquels le testent par l'expérience depuis 30 ans. Il est fondé sur trois familles au sein desquelles deux quarks sont associés à deux leptons. La matière et ses manifestations les plus courantes sont entièrement dues à la famille (u, d, e, ν_e), laquelle comprend les quarks u et d , l'électron et son neutrino associé. Les autres familles contiennent des particules beaucoup plus massives, qui se manifestent dans les désintégrations de particules lourdes, observables seulement dans les accélérateurs ou dans le Cosmos.

modification des fondations risquerait de les faire vaciller. Néanmoins, aux petites distances (inférieures à 10^{-35} mètre), les incertitudes dues à la théorie quantique perturbent vraisemblablement la structure de l'espace-temps. Si un électron est réellement une singularité de l'espace-temps avec une masse (une particule infiniment petite), cette singularité devrait disparaître à cette échelle. À quoi ressemble alors un électron? On l'ignore.

Selon certains théoriciens, les leptons et les quarks sont des manifestations de minuscules objets unidimensionnels, les «supercordes». Sortes de petites structures en forme de fils, les supercordes seraient moins singulières qu'un point. Or, la formulation de la gravitation quantique semble moins ardue dans le cadre d'une théorie des supercordes. On devrait alors supposer que l'espace-temps décrit à l'aide de quatre dimensions (trois d'espace et une de temps) acquiert dix dimensions supplémentaires. Cela semble *a priori* contredire

nos observations, mais seules quatre des dix dimensions auraient des effets macroscopiques ; les autres ne seraient perceptibles qu'à petite distance, et y rendraient la gravitation plus intense. Prenons une image : si nous enroulons une feuille de papier sous forme de cylindre, elle ressemble, vue de loin, à une droite à une dimension. La deuxième dimension, celle qui permet de tourner autour du cylindre, n'est perçue qu'à courte distance. Ainsi en va-t-il des dimensions cachées de l'Univers : elle sont peut-être là, mais si petites que nous ne les voyons pas.

Si notre espace possède effectivement d'autres dimensions à petite échelle, elles pourraient être mises en relation avec certains phénomènes observés par les physiciens des particules. Ainsi, on ignore encore pourquoi la nature semble apprécier le chiffre trois : il y a trois dimensions d'espaces, mais aussi trois familles de leptons, trois familles de quarks, ces derniers ont trois couleurs... Le rôle particulier du chiffre 3 découle peut-être des dimensions cachées et leur nombre. En d'autres termes, peut-être existe-t-il une explication géométrique de ces structures fondamentales du modèle standard. Peut-être réaliserons-nous que les leptons et les quarks ne sont pas ponctuels ; peut-être comprendrons-nous aussi pourquoi leurs masses ont certaines valeurs? Pour le moment, le mystère demeure, mais Bertolt Brecht n'a-t-il pas écrit, en 1921, dans son Journal : «Là où il n'y a pas de mystère, il n'y a pas de vérité»?

Harald FRITZSCH est professeur de physique théorique à l'Université de Munich.

Harald FRITZSCH et Zhi-zhong XING, *Neutrino Mixing and Maximal CP Violation*, Acta Phys. Polon. B31:1349-1364, 2000.

Harald FRITZSCH et Zhi-zhong XING, *Mass and Flavor Mixing Schemes of Quarks and Leptons*, in Prog. Part. Nucl. Phys., 45:1-81, 2000.

Harald FRITZSCH, *An Equation that Changed the World : Newton, Einstein, and the Theory of Relativity*, University of Chicago Press, 1994.

Harald FRITZSCH, *Quarks. Urstoff unserer Welt*, Piper, 1992.

Harald FRITZSCH, *Vom Urknall zum Zerfall. Die Welt zwischen Anfang und Ende*, Piper, 1999.