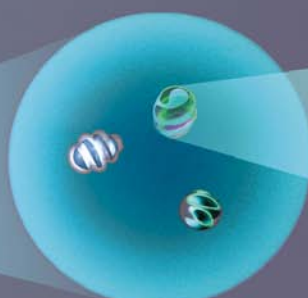


Proton
 $1,7 \times 10^{-15}$ mètre



Quark
Moins de 10^{-18} mètre



Préon (hypothétique)
Ponctuel, ou formé de constituants plus petits encore

Malcolm Gordon

qui constituent les particules des deuxième et troisième générations sont les mêmes que pour la première, il y a certainement quelque chose chez les préons qui permet aux particules d'interagir plus ou moins avec le champ de Higgs. Cela expliquerait pourquoi les particules des générations deux et trois sont plus lourdes.

Le mécanisme de Higgs permet d'expliquer comment les particules acquièrent une masse, mais il ne précise pas les valeurs de ces masses. En l'absence d'une théorie plus fondamentale, les masses des particules subatomiques ne peuvent être déterminées qu'en les mesurant une par une. Il est vraisemblable qu'en comprenant la structure des quarks et des leptons, et pourquoi les générations diffèrent, nous en apprendrons beaucoup plus sur le mécanisme de Higgs.

Un problème de masses

La théorie des préons n'est cependant pas sans problèmes. Tout d'abord, tous les efforts expérimentaux déployés pour mettre en évidence les préons ont été sans résultat. Cet échec est décevant, mais il pourrait simplement être dû aux limites des expériences actuelles, qui ne parviennent pas à sonder de si petites échelles (*voir l'encadré ci-dessus*).

Hormis les questions expérimentales, la théorie des préons présente quelques difficultés intrinsèques. La masse des quarks en est un exemple. Les préons sont confinés en

quarks et leptons. Or la physique quantique indique que les masses pertinentes sont inversement proportionnelles à la taille du volume de confinement. En effet, d'après les relations d'incertitude, formulées par le physicien allemand Werner Heisenberg, la quantité de mouvement des préons, confinés dans le petit volume d'un quark, serait, exprimée en unités d'énergie, de l'ordre du téraélectronvolt (10^{12} électronvolts) au moins. En conséquence, la masse du quark (exprimée aussi en unités d'énergie) devrait être de cet ordre de grandeur. Mais la masse du proton, constitué de deux quarks u et d'un quark d , est de seulement un gigaélectronvolt (10^9 électronvolts), soit de l'ordre de 1 000 fois moins que la somme des masses de ses composants ! En outre, la masse des quarks a été mesurée et correspond à une gamme comprise entre quelques mégaélectronvolts et 173 gigaélectronvolts, bien moins que le téraélectronvolt.

Face au paradoxe d'une entité plus légère que ses composants, des arguments théoriques, fondés sur la conservation de certaines symétries, pourraient expliquer une compensation des quantités de mouvement des préons, et ainsi éviter le problème de masse. Cependant, aucune observation n'a jusqu'ici étayé ces hypothèses.

Les modèles de préons restent à compléter, mais ils constituent une piste intéressante pour résoudre le problème des générations. Ce n'est pas la seule piste. Une alternative qui se distingue est l'idée des

supercordes, selon laquelle les éléments ultimes de la matière ne sont pas des particules subatomiques, mais de minuscules cordes qui vibrent. Grossièrement, on peut se représenter chaque type de particules du modèle standard comme une corde vibrant à une fréquence bien définie. En outre, les préons et les supercordes peuvent coexister, les dimensions des supercordes se situant à une échelle beaucoup plus petite que celle des quarks et des leptons.

Supercordes et préons ?

Si les supercordes existent, elles pourraient bien constituer non pas les quarks et les leptons, mais plutôt les préons ou même les pré-préons, voire les pré-pré-préons, selon le nombre de niveaux d'emboîtement que recèle la matière.

Une autre alternative, s'inspirant des préons, est celle qu'a proposée en 2005 Sundance Bilson-Thompson, de l'Université d'Adélaïde en Australie. Dans son modèle, les préons seraient des tresses torsadées d'espace-temps, des objets constitués du tissu de l'espace-temps, et non des particules ponctuelles. Ce modèle en est encore à ses débuts, mais on en explore les implications, en particulier parce qu'il propose d'intégrer au modèle standard une théorie quantique de la gravitation, objectif sur lequel les physiciens travaillent depuis longtemps.

La physique est avant tout une science expérimentale. Une théorie a beau être

La recherche de désintégrations rares du muon

Encore récemment, le LHC, le grand collisionneur de protons et d'ions du CERN, a montré que les collisionneurs de haute énergie sont parmi les meilleurs outils pour la découverte de nouvelles particules, tel le boson de Higgs en 2012. Cependant, rechercher des particules de plus en plus lourdes signifie construire des accélérateurs toujours plus puissants, ce qui se heurte aux limites de la technologie.

Au lieu de chercher à obtenir des collisions d'énergie maximale, l'expérience *Mu2e*, au *Fermilab*, opte pour des collisions à plus faible énergie, mais en très grand nombre. Cette approche permet de rechercher des processus rares. On espère par cette méthode détecter des désintégrations de particules par l'intermédiaire de nouveaux types d'interaction.

Une telle observation indiquerait l'existence d'une nouvelle particule médiatrice de l'interaction. Cette particule serait créée, puis détruite, au cours du processus. Elle est dite virtuelle. Les particules virtuelles sont

capables d'apparaître sans apport d'énergie équivalent à leur masse, à condition de n'exister que pour un temps très bref – ce qu'autorise le principe d'incertitude de Heisenberg. On peut donc observer indirectement une particule dont la masse dépasse de beaucoup l'énergie disponible dans l'expérience. C'est ainsi que *Mu2e* va tester l'existence de particules jusqu'à 1 000 fois plus massives que l'énergie équivalente disponible au LHC.

Comme son nom l'indique, l'expérience *Mu2e* (se prononce « *Mutoe* » en anglais) étudie la conversion de muons en électrons. Ce processus de désintégration est bien connu, mais il est toujours accompagné de la production de deux neutrinos. L'objectif de *Mu2e* est d'observer cette conversion sans la production de neutrinos.

La désintégration du muon sans émission de neutrinos n'est pas possible dans le modèle standard de la physique des particules. C'est pourquoi l'observer serait synonyme de la découverte d'une nouvelle physique.

Elle pourrait correspondre à une nouvelle interaction ou, comme cela est indiqué dans l'article de Don Lincoln, à l'existence de préons. Les préons du muon sont un état excité de ceux de l'électron. Le retour dans l'état fondamental des préons correspond au processus de transformation du muon en électron avec l'émission d'un photon.

L'expérience *Mu2e* se déroulera en deux étapes. Dans un premier temps, de grandes quantités de muons seront produites en bombardant une cible avec des protons de très haute énergie, fournis par un accélérateur. Ces collisions créeront des pions qui se désintégreront rapidement en muons.

Un champ magnétique guidera les muons sur une distance d'environ 20 mètres vers une cible d'aluminium qui les stoppera. Chaque muon prendra la place d'un électron en orbite autour d'un noyau d'aluminium. Le muon en orbite pourra alors soit se désintégrer, soit être capturé par un proton du noyau en créant un neutron et un neutrino.

La désintégration du muon décrite dans le modèle standard produit des électrons dont l'énergie appartient à un spectre continu, entre 0 et 105 mégaelectronvolts, alors que le nouveau mode de désintégration recherché produirait des électrons de 105 mégaelectronvolts précisément. La difficulté est donc d'observer un faible signal d'un processus rare à proximité du bruit de fond que représente la physique du modèle standard et dont les processus sont plus fréquents. La trajectoire et l'énergie des électrons seront mesurées par plus de 20 000 détecteurs similaires à des compteurs Geiger, faisant cinq millimètres de diamètre et un mètre de longueur.

L'expérience *Mu2e* devra produire 10^{20} muons pour atteindre son objectif (on estime entre 10^{20} et 10^{24} le nombre de grains de sable sur notre planète...). On prévoit que cette expérience recueillera des données durant trois ans, à partir de 2019.

Anthony Hillairet
Université de Victoria, Canada

■ BIBLIOGRAPHIE

D. Lincoln, *The Quantum Frontier: the Large Hadron Collider*, Johns Hopkins University Press, 2009.

P. D. B. Collins et al., *Composite Models*, dans *Particle Physics and Cosmology*, Wiley-VCH, 2005.

I. A. D'Souza et C. S. Kalman, *Preons: Models of Leptons, Quarks and Gauge Bosons as Composite Objects*, World Scientific Publishing, 1992.

H. Harari, *A schematic model of quarks and leptons*, *Physics Letters B*, vol. 86, pp. 83-86, 1979.

M. Shupe, *A composite model of leptons and quarks*, *Physics Letters B*, vol. 86, pp. 87-92, 1979.

brillante, si elle n'est pas en accord avec les mesures, elle est fautive. Que peuvent donc faire les expérimentateurs pour prouver ou réfuter l'existence des préons ? Le modèle standard décrit avec succès les quarks, les leptons et les bosons, sans invoquer de préons. Les physiciens doivent donc être à l'affût de subtils écarts par rapport aux prédictions du modèle standard, de minuscules fissures dans l'édifice de la physique moderne qui pourraient être le fait des préons. Deux facettes du modèle, en particulier, semblent mériter une exploration plus fine.

La première est la taille des particules. Le modèle standard traite les quarks et les leptons comme s'il s'agissait de points, c'est-à-dire des particules de dimension zéro et sans structure interne. Si l'on mesurait une taille non nulle pour ces particules, cela plaiderait en faveur des préons. Les expériences ont montré que les protons et les neutrons ont un rayon d'environ 10^{-15} mètre. Avec les principaux collisionneurs de particules, passés et présents, les physiciens ont recherché, pour les quarks et les leptons, des indices d'une taille mesurable. Pour l'instant, toutes les données

sont en parfait accord avec une taille nulle. Les résultats expérimentaux livrent des limites supérieures sur la taille des particules : 0,0002 fois la taille du proton pour les quarks, 0,001 fois cette taille pour les leptons. Les expériences ne sont cependant pas capables de trancher entre un rayon exactement nul ou extrêmement petit. Le LHC, au CERN, devrait nous permettre d'en apprendre davantage sur la taille des quarks et des leptons, grâce à l'énorme quantité de données ainsi qu'à la montée en énergie prévue pour l'accélérateur d'ici 2015.

À l'épreuve de la réalité

Une autre façon de mettre en évidence une sous-structure des particules, au moins pour les leptons, consiste à s'intéresser à leur spin et à leur moment magnétique, deux grandeurs liées. De façon erronée, mais commode, on peut se représenter un électron comme une bille en rotation sur elle-même ; plus précisément, la physique quantique attribue à l'électron un moment cinétique intrinsèque nommé spin. Comme tous les fermions fondamentaux, l'électron a un spin égal à $1/2$, dans les unités