

adaptation. La réponse fut le mécanisme de Brout-Englert-Higgs, extraordinairement élégant, qui expliquait comment les bosons pouvaient être massifs alors que le modèle, dans sa version précédente, le leur interdisait. Ce mécanisme prédisait dès les années 1960 l'existence d'un nouveau boson dit «de Higgs». On l'a cherché, et on a fini par mettre la main dessus en 2012 (toujours ces allers-retours entre l'expérience et la théorie!). Pourquoi tout ce temps? Les «sections efficaces» de production du boson de Higgs sont extraordinairement petites, ce qui signifie qu'en produire est très rare, même au LHC (le grand collisionneur de hadrons du Cern), et la théorie ne prédisait pas sa masse, finalement mesurée à 125 GeV. On avait éliminé des grands pans de masse possibles, mais les zones à étudier restaient très larges : avec une autre masse, il aurait été encore plus dur à observer. Historiquement, il a donc cette place à part d'avoir été le dernier, comme un couronnement. Maintenant, je n'aime pas les délires : «Waouh, c'est la particule de Dieu!» Retirez n'importe quelle particule, et tout s'effondre : j'aimerais bien savoir à quoi ressemble un modèle standard sans l'électron!

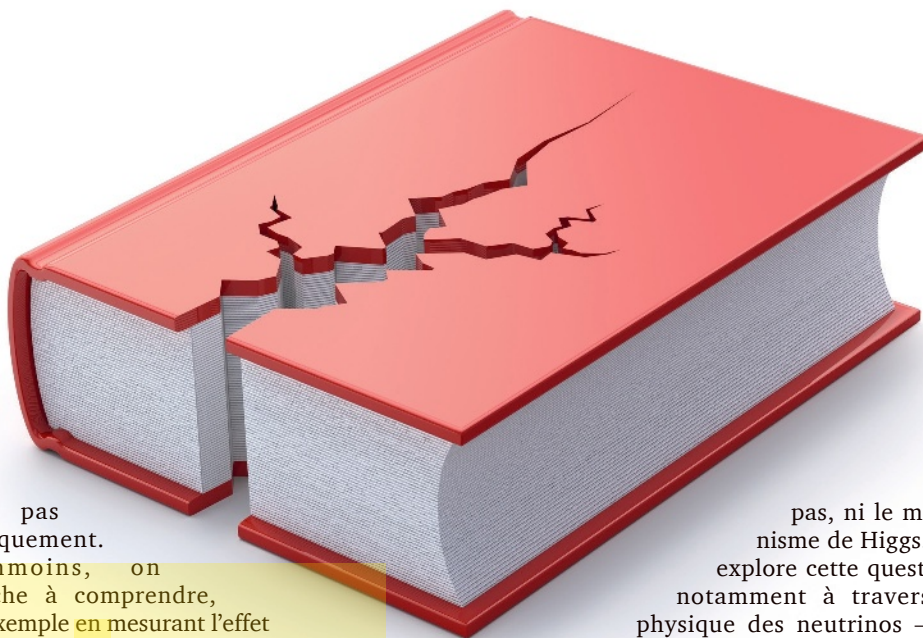
Y a-t-il, chez les physiciens des particules, un désir de «torpiller» le modèle standard?

Juste pour le plaisir? Non! Ce n'est pas parce qu'Einstein a mis en place les équations de la relativité générale qu'on a «torpillé» Newton. Si je jette mon stylo à travers la pièce, ce qui va arriver est parfaitement décrit par

la physique newtonienne. L'édifice «modèle standard» est indétrônable, tout ce qu'il décrit l'est avec une précision époustouflante. En revanche, il laisse des questions ouvertes, et, pour un chercheur, une question ouverte... ça démange! Il ne s'agit donc pas de «torpiller» le modèle, mais d'aller au-delà. Vraiment. On attend surtout de voir où il craque, car, pour l'instant, on manque d'indications pour savoir dans quelle direction chercher. On voudrait bien qu'il nous donne un petit indice, du genre : il faut aller à plus haute énergie, ou bien chercher dans tel sous-système de particules.

La gravitation est l'une des quatre grandes forces, mais on ne voit aucun graviton dans le modèle standard. Est-ce une carence?

On n'a jamais réussi à quantifier la gravitation, c'est-à-dire la rendre compatible avec la physique quantique, au même titre que les trois autres interactions fondamentales que sont les interactions électromagnétique, forte et faible : on ne sait pas la faire entrer dans le modèle avec le même formalisme (le lagrangien). Si c'était possible, il y aurait en effet une particule de la gravitation qui serait le graviton. Il y a donc un mur théorique. Maintenant, si je prends deux quarks up côte à côte, distants de 10^{-18} mètre, et que j'affecte la valeur 1 à l'intensité électromagnétique qui les repousse, alors l'interaction faible entre eux sera d'intensité 0,8, l'interaction forte de 25, et l'interaction gravitationnelle, qui existe aussi, de... 10^{-41} ! C'est indiscernable. En résumé, ça nous gêne intellectuellement,



mais pas pratiquement.

Néanmoins, on cherche à comprendre, par exemple en mesurant l'effet de la gravitation sur l'antimatière : *a priori*, elle devrait subir la gravitation terrestre comme la matière, mais avec 41 ordres de grandeur en dessous, c'est très délicat à mesurer. Par ailleurs, depuis 2015, on dispose aussi d'un « outil » génial : les ondes gravitationnelles. Ce sont des oscillations de l'espace-temps produites par des masses – énormes – en mouvement. Elles ont été prédites par Einstein en 1916 et permettent d'aller sonder l'espace-temps autour des trous noirs pour tester la physique des particules en champ gravitationnel fort. L'Univers n'a jamais été opaque aux ondes gravitationnelles, contrairement à la lumière, ce qui fait qu'il y a sans doute moyen de capter un fond d'ondes gravitationnelles issu des premiers instants de l'Univers. Cela nous donnerait accès, selon certaines théories, à ce qui s'est passé au moment de la mise en place du mécanisme de Higgs, quand les bosons vecteurs massifs sont apparus.

Les masses des particules sont très disparates. Comprend-on pourquoi ?

La réponse est non. L'échelle des masses est bizarre et il n'y a aucune explication. Pourquoi celle des neutrinos est-elle si faible qu'on ne l'a toujours pas mesurée ? Pourquoi le quark top est-il un monstre, 175 fois plus lourd qu'un proton lui-même constitué de trois quarks légers ? Le modèle standard ne l'explique

pas, ni le mécanisme de Higgs. On explore cette question, notamment à travers la physique des neutrinos – un énorme domaine de recherche.

On se demande par exemple si les neutrinos sont leur propre antiparticule. Ils seraient les seuls fermions, ou particules de matière, à l'être. Ou bien encore quelles sont les valeurs des paramètres qui gouvernent les oscillations de neutrinos ? Les neutrinos sont produits avec ce qu'on appelle une « saveur » donnée : un neutrino produit conjointement avec un électron est un neutrino électronique, avec le muon, un neutrino muonique, et avec le tau, un neutrino tauique. Or, en fonction de l'énergie d'un neutrino et de la distance à laquelle il est détecté, il y a une certaine probabilité pour qu'il le soit avec une autre saveur que celle avec laquelle il a été produit (voir *La possible fécondité du neutrino stérile*, par W. C. Louis et R. Van der Water, page 26). Étudier les oscillations de neutrinos nous donne aussi accès à la différence de comportement entre matière et antimatière dans le secteur des leptons, c'est-à-dire les particules de matière qui ne sont pas des quarks.

Pourquoi n'y a-t-il plus d'antimatière : le modèle standard répond-il à cette question ?

C'est compliqué à expliquer. Il faut trouver des mécanismes qui permettent, dans un Univers symétrique entre matière et