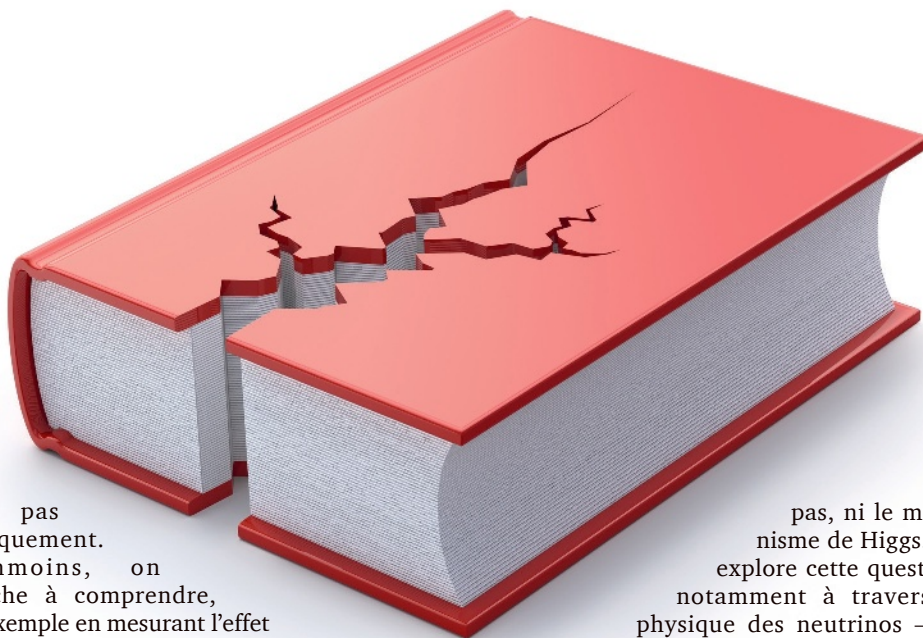




mais pas pratiquement. Néanmoins, on cherche à comprendre, par exemple en mesurant l'effet de la gravitation sur l'antimatière : *a priori*, elle devrait subir la gravitation terrestre comme la matière, mais avec 41 ordres de grandeur en dessous, c'est très délicat à mesurer. Par ailleurs, depuis 2015, 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

Je n'aime pas les délires
« boson de Higgs = 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 !

14 antimatière au moment du Big Bang, d'annihiler plus d'antimatière que de matière pour qu'aujourd'hui seule cette dernière ait subsisté. Pour cela, on imagine, par exemple, que des processus physiques ne respectent pas les symétries entre matière et antimatière. De tels processus sont inclus dans le modèle standard. Par exemple, ceux qui mettent en jeu l'interaction faible ne respectent pas le produit de la symétrie C (pour charge), symétrie entre particule et antiparticule, de la symétrie P (pour parité), symétrie entre un processus et son image dans un miroir : c'est ce qu'on appelle la « violation de la symétrie CP ». On cherche à les mesurer en laboratoire. Malheureusement, les valeurs obtenues ne suffisent pas à expliquer la disparition de l'antimatière dans l'Univers. On continue de chercher.

95 % de l'Univers nous est inconnu, composé d'énergie sombre et de matière noire.

En effet, le modèle standard ne nous dit rien sur les 70 % que représente à elle seule l'énergie sombre. En revanche, un modèle standard cosmologique est en train de s'affirmer (en anglais, on l'appelle *lambda cold dark matter model*), et, lui, nous dit des choses... même s'il n'est pas encore tout à fait standard. On passe aux grandes échelles, à quelque chose de piloté par la gravitation, on n'est plus du tout dans le même domaine. Concernant la matière noire, quand on met dans ce modèle standard cosmologique les

particules du modèle standard qui pourraient faire de bonnes candidates, on ne parvient pas à expliquer la matière noire. Conclusion : on ne sait pas ce que c'est, mais on sait que ce n'est pas, ou pas seulement, une particule du modèle standard. Ce n'est pas si mal.

Le modèle standard classe les particules en trois familles, sans que ce soit très bien justifié.

Oui, pourquoi pas quatre ? À partir de trois familles, la théorie devient très naturelle mathématiquement. Dit autrement, on a assez de degrés de liberté pour prendre en compte des phénomènes comme les différences entre matière et antimatière mentionnées plus tôt. Un résultat très solide sur le nombre de familles est donné par la désintégration du boson Z en neutrinos. Des dizaines de millions d'événements ont permis d'établir une courbe très précise, l'une des plus belles en physique des particules. Elle mesure le nombre de familles de neutrinos dans lesquelles se désintègre le boson Z. Et il y en a clairement trois, avec une précision remarquable. Pour des questions de conservation de l'énergie, précisons que le boson Z ne se désintègre qu'en deux neutrinos, dont la masse fait au plus la moitié de celle du Z. Donc on pourrait envisager une quatrième famille, mais son neutrino devrait avoir une masse de plus de 45,5 GeV, ce qui est énorme. Bref, une quatrième famille existe peut-être, mais à excessivement haute masse, et pour le moment on n'a rien vu.