

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.

Pourtant, au LHC, on voit loin, jusqu'au TeV, soit le millier de GeV !

Comment dépasser le modèle standard ?

Il y a de nombreuses voies. L'une, comme je l'ai indiqué, consiste à lui faire dire dans quel petit recoin de la théorie se trouvent d'éventuelles failles. Cela demande de faire de la physique de précision. En clair, les théoriciens travaillent de leur côté pour prédire les valeurs des paramètres ou des mesures ; les expérimentateurs mesurent avec la plus grande précision possible ; et on espère voir des écarts révélateurs. Pour l'heure, ce n'est pas le cas, le modèle est redoutablement prédictif. Néanmoins, l'expérience *LHCb*, et d'autres, voient des désaccords à trois sigmas, c'est-à-dire trois écarts standard, dans l'universalité leptonique qui dit qu'électrons, muons et taus se comportent de la même façon, alors qu'il en faut cinq pour être significatif (voir *Un quark fait de la résistance*, par S. Descotes-Genon, page 72). Pas de quoi déboucher le champagne, mais la bouteille a été mise au frais ! On peut encore gagner en précision sur d'autres paramètres, en particulier la masse du boson W et du quark top. Au LHC, des programmes entiers de physique sont dédiés à la mesure de ces masses de la façon la plus précise possible, toujours pour tester la cohérence interne du modèle standard.

Et les autres voies ?

Une deuxième voie est d'interroger directement la structure du modèle standard, par exemple ses symétries ou, à l'inverse, les violations de symétrie. C'est un énorme pan de la physique actuelle des particules. Une troisième, d'attaquer les lacunes par la cosmologie et l'astrophysique, en interrogeant l'Univers où il peut donner des réponses sur l'énergie sombre et la matière noire ; d'ailleurs, la cosmologie nous donne les limites les plus strictes sur la somme des masses des neutrinos. Mais on recherche aussi des particules au-delà du modèle standard, avec des modèles – comme la supersymétrie – qui prédisent d'autres particules. Ça se fait directement au LHC, par exemple. Il va d'ailleurs redémarrer au printemps 2022, et livrer une quantité de données encore augmentée dans lesquelles se cachent peut-être des indices...

Les outils scientifiques actuels suffisent-ils ?

En physique fondamentale, plusieurs dizaines d'années s'écoulent entre « j'ai une idée géniale » et « ma R & D me permet de la tester expérimentalement ». Ensuite, on exploite les instruments pendant plusieurs décennies. Le temps long, on a l'habitude. Évidemment, une foule de questions de stratégie se posent. Faut-il être prudent, réfléchir à d'autres moyens que les collisionneurs ? Se lancer dans la construction d'un accélérateur à 100 TeV ? Ou se projeter à long terme dans une machine encore plus folle comme les collisionneurs à muons, qui va demander des développements considérables pendant très longtemps ? La bonne nouvelle, c'est que les chercheurs, s'ils peuvent manquer d'instruments, ne sont jamais à court d'imagination. J'ai besoin de tester un truc avec des particules à 10^{21} eV (un milliard de TeV) d'énergie ? C'est impossible sur Terre, mais l'Univers m'offre gratuitement des « pevatrons », c'est-à-dire des producteurs naturels de particules au pétaélectronvolt (10^{15}) ! Ça s'appelle une galaxie... Est-ce que je peux aller voir le Big Bang ? Non, mais l'Univers m'envoie des ondes gravitationnelles qui en gardent la trace. Il suffit de savoir aller chercher ailleurs.

Sommes-nous dans la même situation qu'à la fin du XIX^e siècle, avec un édifice qu'on croit presque achevé et quelques anomalies à régler ?

Je ne suis pas en train de dire qu'on va rester avec le modèle standard. On cherche activement à aller au-delà, ce n'est donc pas pareil. Le point commun avec le XIX^e siècle, c'est qu'on n'a pas d'indice : juste des questions ouvertes. Sur l'énergie sombre, expérimentalement, on ne sait pas où attaquer certaines choses, par exemple avec DESI, au télescope *Mayall*, de Kitt Peak, en Arizona, qui interroge la structure de l'Univers à grande échelle pour cerner l'évolution de l'énergie sombre et l'expansion de l'Univers. Le problème de la matière noire, on l'attaque par à peu près tous les bouts, que ce soient les recherches directes au LHC ou l'observation du centre galactique par l'expérience *HESS*, en Namibie, par exemple. Mais peut-être nous faut-il un nouveau génie qui offre un changement de paradigme complet. Einstein, reviens !

Propos recueillis par Olivier Voizeux