

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.

15

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

À la recherche de nouvelles particules

Depuis que le boson de Higgs a été découvert

expérimentalement en 2012, le modèle standard est complet :

toutes les particules prédites par la théorie sont tombées

l'une après l'autre sous la loupe des détecteurs. Beaucoup

considèrent ce modèle comme la plus belle construction

théorique de toute l'histoire des sciences. Le seul hic,

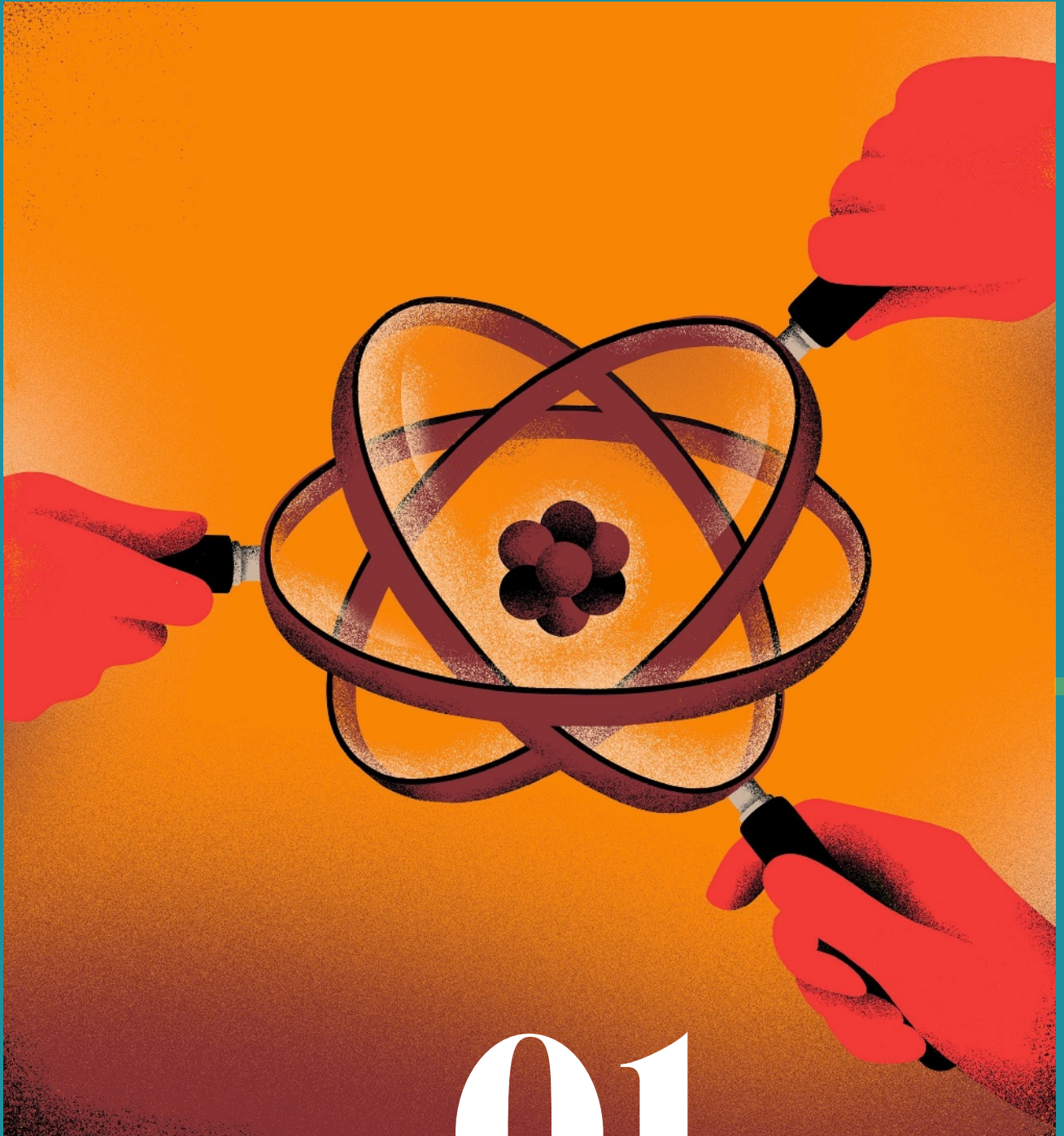
c'est qu'il n'explique que... 5 % de l'Univers ! Voilà pourquoi

la chasse aux particules continue. Nouveaux neutrinos, axions,

tétraquarks, etc., les physiciens n'ont jamais témoigné

autant d'ardeur à faire émerger de leurs expérimentations

de nouvelles créatures annonçant une nouvelle physique.



© Sébastien Thibault/Pour la science

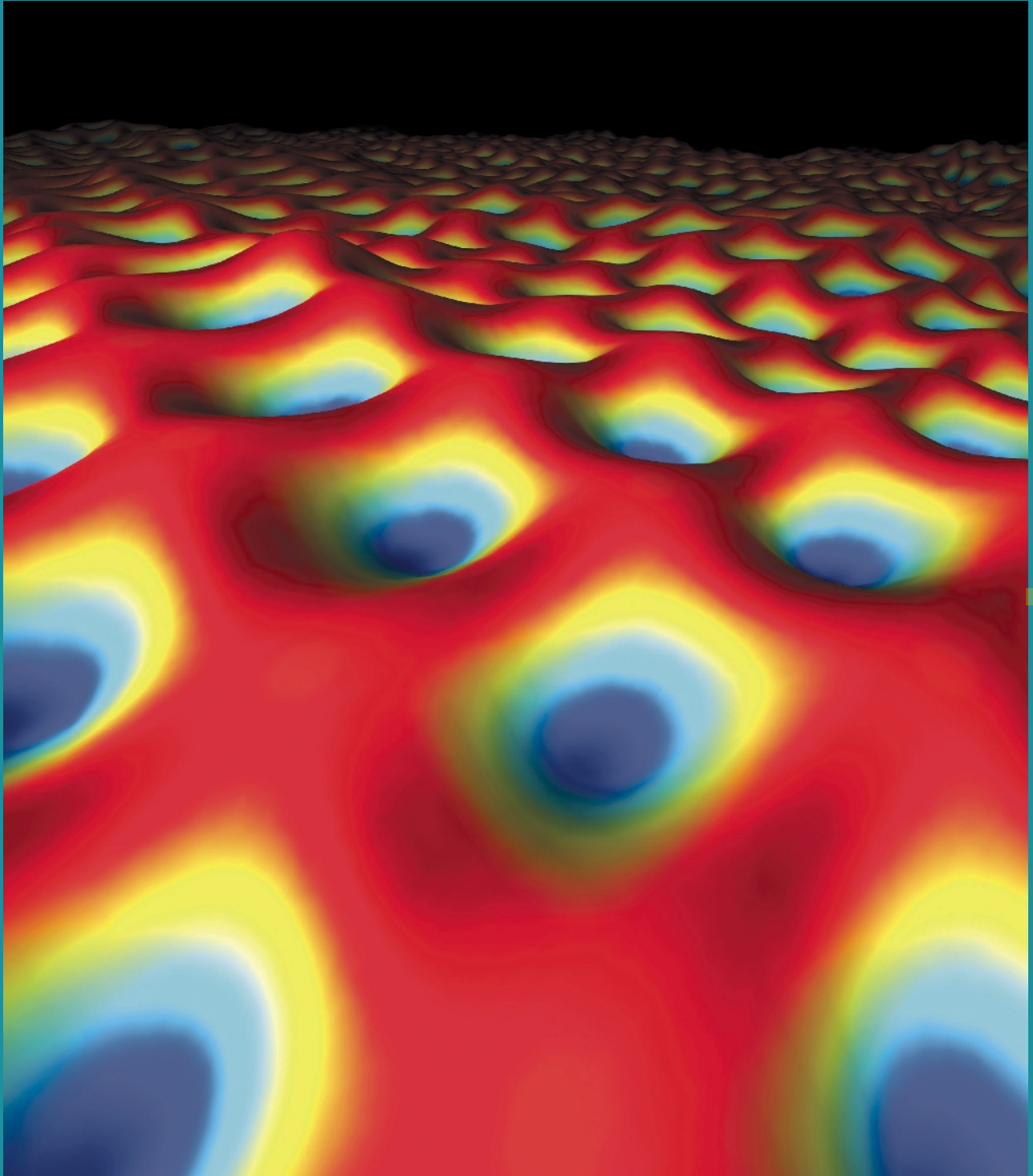
01

Au-delà des équations, il y a le réel, que la physique décrit parfois de manière déconcertante. Ainsi, à la question: « La matière est-elle faite de particules, de champs ou des deux? », elle donne... trois réponses!

De quoi le réel est-il fait?

Charles T. Sebens

→ Une surface métallique, à l'échelle subnanométrique, montre une mer d'électrons (*en rouge*). Cette particule a été au cœur des débats philosophiques entre les physiciens Albert Einstein et Walther Ritz.



Bien avant que la philosophie et la physique ne se séparent pour suivre deux carrières distinctes, les philosophes naturels de la Grèce antique spéculaient à propos des composants de base à partir desquels toute chose est faite. D'après Platon, tout ce qui se trouvait sur Terre était constitué de quatre particules fondamentales. Il y avait les particules stables de la terre, en forme de cubes; les particules du feu pointues, tranchantes et en forme de tétraèdres; les particules de l'air, moins pointues et octaédriques; et les particules d'eau, raisonnablement rondes et icosaédriques, c'est-à-dire à 20 côtés. Platon pensait que ces particules pouvaient être créées et détruites. Par exemple, une particule d'air à huit faces pouvait résulter de la combinaison de deux particules de feu à quatre faces comme on peut imaginer que cela se produit lorsqu'un feu de camp s'éteint. Cette vision a vécu, et l'on sait désormais que la matière est constituée d'atomes, eux-mêmes faits de particules plus fondamentales.

Désormais, les philosophes qui souhaitent élucider le mystère de la composition de toute chose cherchent des réponses dans la physique contemporaine. Cependant, lire des manuels universitaires ne suffit pas. Les physiciens alternent astucieusement entre différentes visions du réel (relativité générale, mécanique quantique) selon la tâche à accomplir. Les manuels sont rédigés pour apprendre à employer les outils mathématiques avec efficacité, et non pour dire ce que les équations décrivent vraiment. Comprendre ce qui se passe dans la nature à partir des mathématiques exige un grand labeur. Ce genre de recherche relève de la «philosophie de la physique» lorsqu'il est mené par des philosophes,

— En bref —

> Le modèle standard n'indique pas clairement si les briques élémentaires qui constituent le réel sont des particules quantiques, des champs quantiques ou une combinaison des deux.

> Pour Albert Einstein, les électrons étaient des particules et des champs; pour Walther Ritz, seulement des particules; pour Michael Faraday, seulement des champs.

> Un argument en faveur de la théorie «tout champ», sans particule, est qu'elle concilie certaines observations sur les propriétés du spin.

et de l'étude des «fondements de la physique» quand il est conduit par des physiciens.

Ces derniers ont sans cesse perfectionné le modèle standard, une sorte de tableau périodique des composants fondamentaux de la matière et des forces qu'elle subit. Malgré ses lacunes, il n'est pas près d'être balayé. Tout comme la théorie de la gravité d'Isaac Newton ou la théorie de l'électrodynamique de James Clerk Maxwell, il restera un édifice important de la physique, quoi qu'il arrive.

Malheureusement, ce qui correspond dans le modèle standard aux atomes du tableau périodique n'est pas très bien défini. Les briques fondamentales qui constituent la réalité sont-elles des particules quantiques, des champs quantiques ou une combinaison des deux? Afin de s'attaquer à cette question difficile, considérons le débat entre particules et champs dans le contexte d'une théorie classique (non quantique): celle de l'électrodynamique de Maxwell.

CE QUE LES ÉLECTRONS PERÇOIENT

C'est en s'engageant dans la recherche fondamentale sur l'électrodynamique qu'Albert Einstein en est arrivé à formuler sa chère théorie de la relativité en 1905. Par la suite, il a débattu avec le physicien théoricien suisse Walther Ritz de la bonne manière de formuler et de comprendre l'électrodynamique classique. D'après cette théorie, deux électrons placés près l'un de l'autre flottent dans des directions opposées. Ils se repoussent, car ils ont tous deux une charge négative.

Selon Walther Ritz, il y a interaction directe entre les deux électrons – chacun poussant