Pour la Science
HORS-SÉRIE
La science expliquée par ceux qui la font
n° 114 - 02.22/03.22

L 13264 - 114 H - F: 7,90 € - RD

« On ne comprend pas encore pourquoi les masses des particules sont aussi disparates »

Nathalie Besson,
physicienne des particules au CEA

Physique des particules

DÉPASSER LE MODÈLE STANDARD ?

Le muon sème la discorde

Dix ans de révolte chez les mésons B

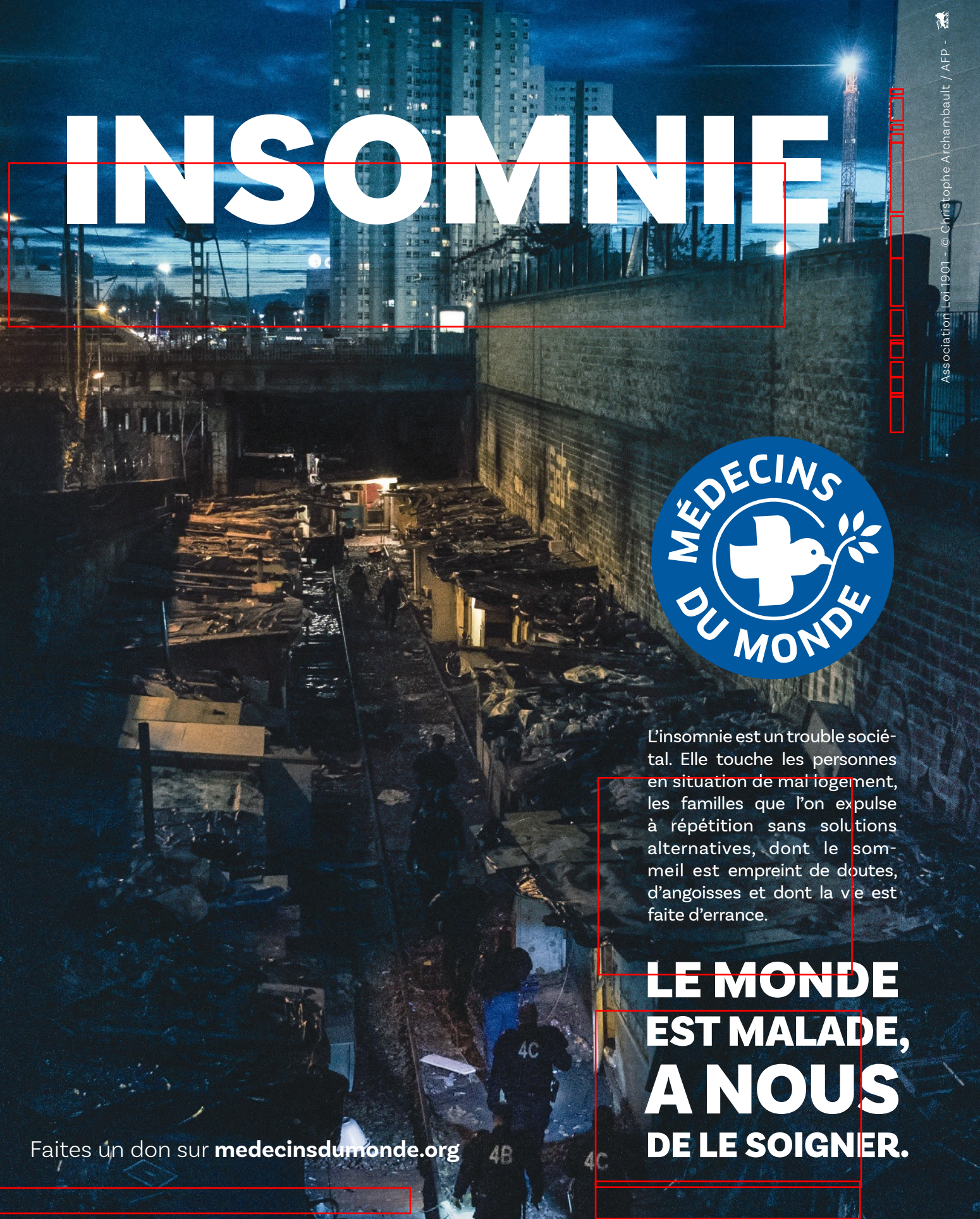
Cet étrange hadron à 4 quarks

Les champs caméléons de l'énergie sombre

Édition française de Scientific American – BEL.: 9,40 € - CH: 17,10 FS – LUX.: 8,95 € - CAN.: 13,20 $CA

POUR LA SCIENCE
PHYSIQUE DES PARTICULES Dépasser le modèle standard ?
Hors-série numéro 114

INSOMNIE



Association Loi 1901 - © Christophe Archambault / AFP -

MÉDECINS DU MONDE

L'insomnie est un trouble sociétal. Elle touche les personnes en situation de mal logement, les familles que l'on expulse à répétition sans solutions alternatives, dont le sommeil est empreint de doutes, d'angoisses et dont la vie est faite d'errance.

LE MONDE EST MALADE, A NOUS DE LE SOIGNER.

Faites un don sur **medecinsdumonde.org**

Pour la Science HORS-SÉRIE

Einstein, reviens !

par **Loïc Mangin**
Rédacteur en chef adjoint
à *Pour la Science*

En 1894, le physicien Albert Michelson affirme : « Il semble probable que la plupart des grands principes sous-jacents [à la physique] ont été fermement établis. » Ainsi, la physique apparaît achevée, à deux détails près : le rayonnement du corps noir (la lumière émise par un corps chauffé) et l'invariance de la vitesse de la lumière. La résolution de ces deux problèmes conduira à la naissance de la physique quantique et de la théorie de la relativité… Rien de moins.

L'histoire bégaierait-elle ? Aujourd'hui, les physiciens disposent pour étudier la structure fondamentale de la matière d'un cadre théorique solidement établi : le modèle standard. Mais quelques « détails » ne le rendent pas entièrement satisfaisant… D'abord, il ne dit rien de 95 % du contenu de l'Univers, les mystérieuses « matière noire » et « énergie sombre ». Ensuite, plusieurs résultats peinent à entrer dans le cadre. Enfin, de grandes questions restent encore sans réponse, comme l'étonnante disparité des masses des particules. Le modèle standard est-il au bord de la rupture ? Les articles de ce numéro tentent de répondre et esquissent des pistes pour aller au-delà sans nécessairement le rendre caduc. Comme la théorie de la relativité a englobé la physique newtonienne sans la chasser.

Et l'on peut espérer, avec la physicienne Nathalie Besson, l'avènement d'un nouvel Einstein pour nous indiquer quelle direction prendre.

Ont contribué à ce numéro

Nathalie Besson
est physicienne des particules au CEA, à l'institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers. Elle a participé à l'expérience *Atlas*, au LHC.

Sébastien Descotes-Genon
est physicien des particules, directeur de recherche au CNRS et directeur adjoint du Laboratoire de physique des deux infinis Irène-Joliot-Curie.

Chandrashekhar Joshi
est professeur de génie électrique à l'université de Californie, à Los Angeles, où il dirige le groupe Laser-plasma.

Laurent Lellouch
est directeur de recherche au CNRS et responsable de l'équipe de physique des particules au Centre de physique théorique, à Marseille.

SOMMAIRE

La physique des particules

DÉPASSER LE MODÈLE STANDARD ?

p. 6 Repères

Des schémas, des chiffres, des définitions… L'essentiel pour apprécier ce numéro.

p. 10 Grand témoin

Nathalie Besson

Voir où le modèle craque pour aller au-delà.

01

À la recherche de nouvelles particules

p. 18 De quoi le réel est-il fait ?

Charles T. Sebens

De particules, de champs ou des deux ? Un vrai casse-tête.

p. 26 La possible fécondité du neutrino stérile

William Charles Louis et Richard Van de Water

Où l'on discute d'une quatrième « saveur » possible du neutrino.

p. 36 La physique passe à l'axion

Chanda Prescod-Weinstein

Il serait doublement utile, l'axion, mais existe-t-il ?

p. 46 2+2 font quark, et même tétraquark

Davide Castelvecchi

Cette drôle de particule associe quatre quarks. Une rareté !

PORTFOLIO

p. 50 Chambres avec vue sur particules

Panorama express, en images, des détecteurs historiques.

02

Des événements étranges

p. 58 Le muon sur la sellette
Sean Bailly
Cousin massif de l'électron, le muon divise les physiciens.

ENTRETIEN
p. 68 L'anomalie magnétique du muon, un défi théorique !
Laurent Lellouch

p. 72 Un quark fait de la résistance
Sébastien Descotes-Genon
Le quark b est un frondeur : il désobéit au modèle standard.

p. 80 Accélérons les accélérateurs
Chandrashekhar Joshi
Plus rapide et moins chère ? La techno du plasma fait rêver.

03

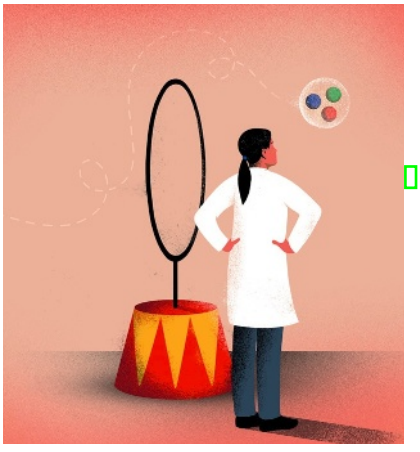
Le côté obscur de l'Univers

p. 92 L'insaisissable matière noire
Pauline Gagnon
Plus que noire, elle est invisible. Mais elle existe : la preuve.

p. 102 Beaucoup d'appelés, pas encore d'élu
Marco Cirelli
Qu'est donc la matière noire ? Petite revue des candidats.

p. 112 Les cachotteries de l'énergie sombre
Philippe Brax
Elle compose 70 % de l'Univers. Et se cache obstinément.

p. 120 Les incontournables
Des livres, des expositions, des podcasts… Les coups de cœur de la rédaction.



La physique des particules en express

Le tableau ci-contre est un résumé du modèle standard, cette théorie qui décrit mathématiquement les composants élémentaires de la matière et les interactions qui les régissent. Élaboré dans les années 1960 et 1970, il s'appuie, d'une part, sur la physique quantique, qui décrit le comportement de la matière à très petite échelle, et, d'autre part, sur la théorie de la relativité d'Einstein, qui rend compte des situations dans lesquelles les vitesses des corps sont proches de celle de la lumière. Tous ces composants prennent le nom de « particules », un terme difficile à définir car il défie l'intuition : ce n'est pas une bille miniature, puisqu'elle n'a pas de dimension spatiale mesurable. En physique quantique, une particule est toujours associée à un champ qui est non matériel. Elle est même l'excitation de ce champ, comme une vague est l'excitation de la mer.

LES 12 PARTICULES…

Elles composent la matière telle que nous la connaissons et prennent le nom de **fermions**. On distingue six quarks et six leptons.

> les quarks : leurs six espèces sont surnommées « saveurs ». Chacun des noms de saveurs est historique et n'a aucune signification physique (par exemple, le quark *top* n'est pas au-dessus des autres). En se regroupant, ils forment des particules composites tels que les protons et neutrons (*voir page 8*).

> les leptons : ils ne s'assemblent qu'exceptionnellement. On peut les étudier seuls, contrairement aux quarks, qui sont toujours groupés.

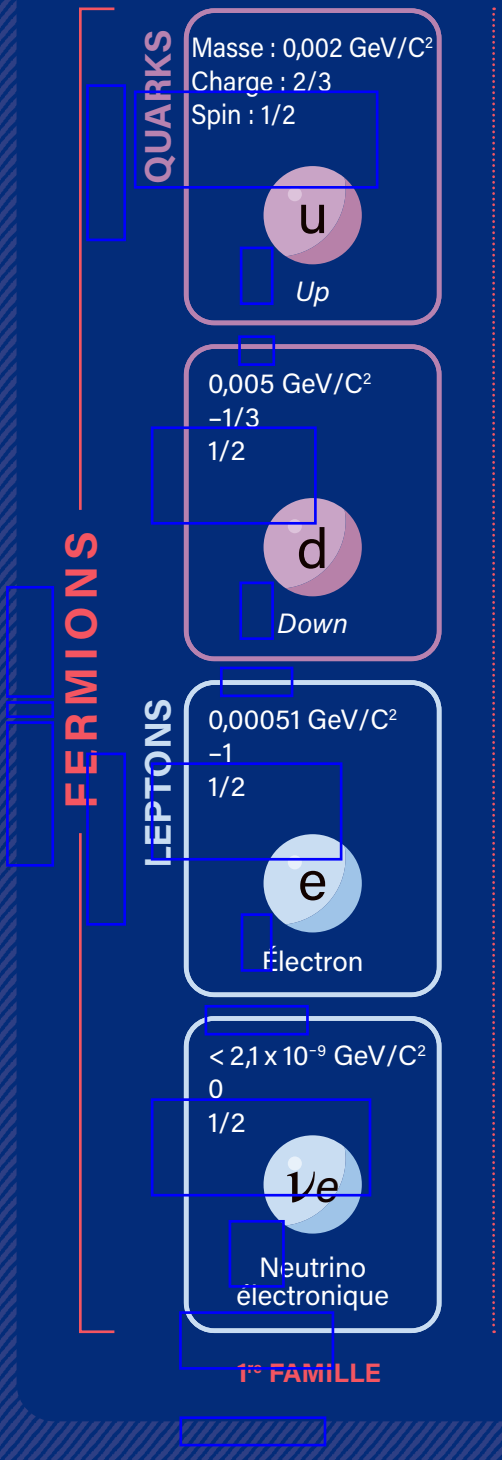
Chaque fermion est identifiable par trois caractères :

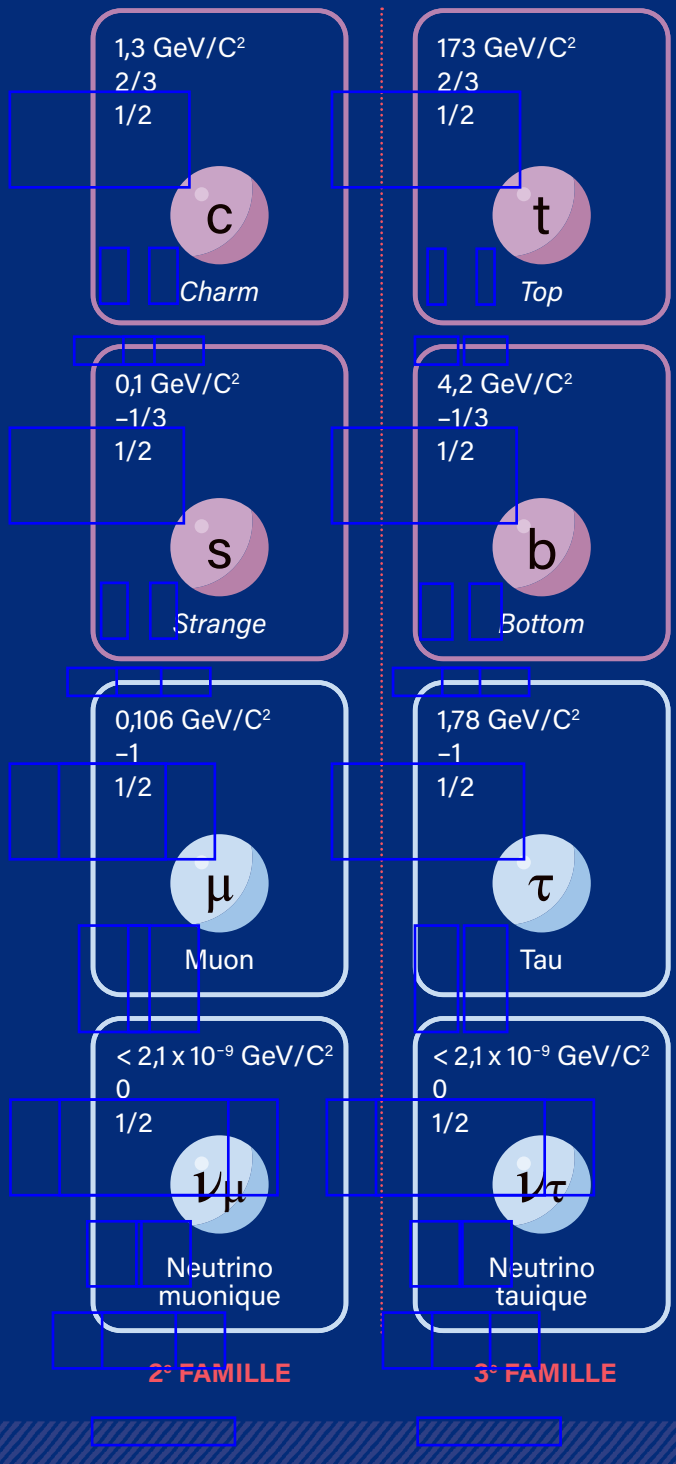
> sa masse : à cette échelle, on choisit de l'exprimer en énergie du fait de l'équivalence démontrée par Albert Einstein entre masse et énergie ($E=mc^2$). L'unité ici est le gigaélectronvolt divisé par la vitesse de la lumière au carré.

> sa charge électrique : positive ou négative (exprimée en sous-multiple de la charge élémentaire e, égale à la valeur absolue de la charge de l'électron). Un fermion sans charge est électriquement neutre.

> son spin : caractère quantique qui ne peut être comparé à rien de connu à notre échelle. Il est responsable d'une partie des propriétés magnétiques à l'échelle subatomique. Les fermions ont un spin demi-entier (½).

Les quarks portent aussi une « charge de couleur », non mentionnée sur le tableau et qui est à l'interaction forte ce que la charge électrique positive ou négative est à la force électromagnétique (*voir page 8*). Un quark peut avoir trois couleurs, appelées par convention « rouge », « bleu » et « vert ».





... ET LEURS ANTIPARTICULES

À toute particule est associée une antiparticule : par exemple, pour l'électron, c'est le positron (ou antiélectron). La masse est la même, le spin aussi ; la charge électrique est opposée. Chaque antiquark a aussi une « anticouleur » correspondante : antirouge, antibleu et antivert.

Les 3 familles

En lisant le tableau verticalement, les fermions peuvent être regroupés en trois familles de même structure :
- deux quarks, électriquement chargés
- un lepton électriquement chargé
- un neutrino électriquement neutre

> 1re famille

u d e ν_e

Elle rassemble les particules stables à l'origine de la matière dite « ordinaire ».

> 2e famille

c s μ ν_μ

> 3e famille

t b τ ν_τ

Les 2e et 3e familles sont plus lourdes, instables (la durée de vie de ces particules est inférieure à 10^{-10} s) et se trouvent difficilement dans notre environnement. On peut les produire dans un collisionneur. Elles sont aussi présentes dans les rayons cosmiques ou étaient présentes dans les premiers temps de l'Univers.

© Couleurs Autrement

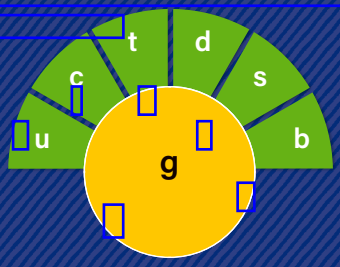
Les 3 interactions fondamentales

Deux particules interagissent en échangeant en permanence d'autres particules, les bosons médiateurs (ou vecteurs), qui véhiculent l'interaction fondamentale associée. D'après le modèle standard, ces interactions, aussi appelées « forces », sont au nombre de trois.

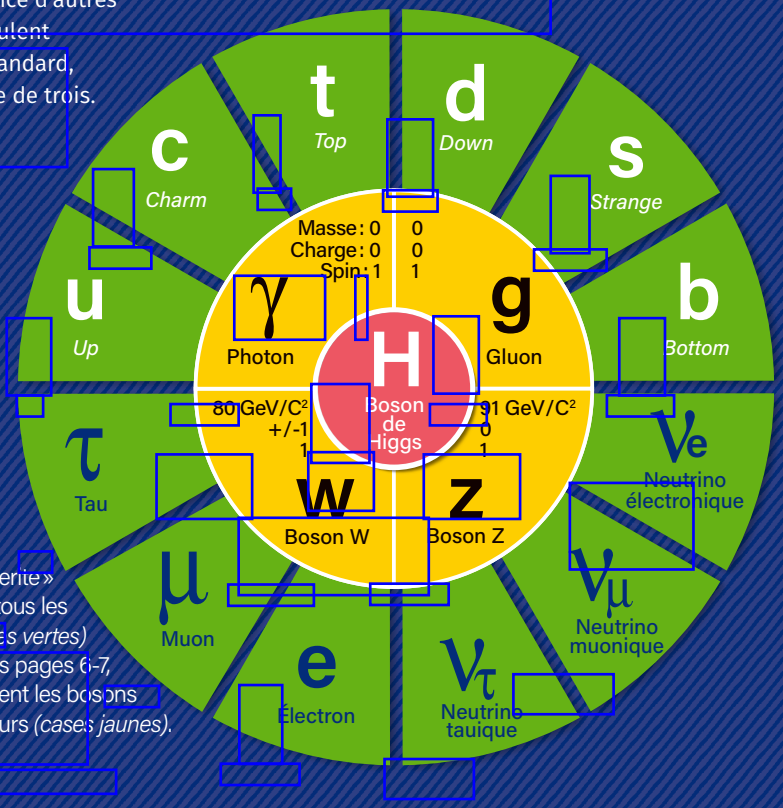
1) Interaction forte

En agissant sur les quarks contenus dans les protons et les neutrons, elle contrebalance la répulsion électromagnétique entre protons et explique la stabilité des noyaux atomiques.

> Responsable : les gluons
> Portée : 10^{-15} m
> 6 fermions, tous des quarks, y sont sensibles.



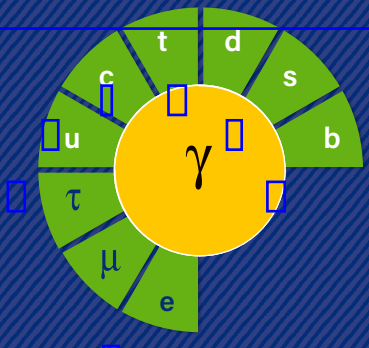
Cette « marguerite » reprend tous les fermions *(cases vertes)* du tableau des pages 6-7, auxquels s'ajoutent les bosons médiateurs *(cases jaunes)*.



2) Interaction électromagnétique

La seule connue par l'expérience quotidienne et étudiée par la physique « classique ».

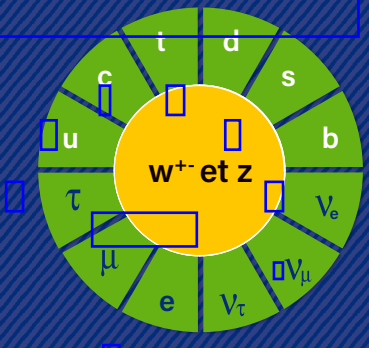
> Responsable : le photon
> Portée : infinie
> 9 fermions y sont sensibles.



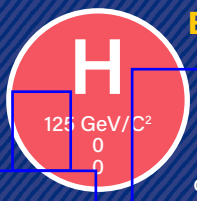
3) Interaction faible

Elle gouverne en particulier les désintégrations de type bêta des particules élémentaires et des noyaux.

> Responsable : les bosons W^+, W^- et Z
> Portée : 10^{-17} m
> tous les fermions y sont sensibles.



Et le boson de Higgs ?



C'est un boson d'un type nouveau (boson scalaire) car son spin a pour valeur 0 (au lieu de 1 pour les autres bosons). Il fournit une masse aux particules élémentaires. Les particules interagissent directement avec le champ de Higgs ; le boson de Higgs est une manifestation de ce champ.

© Pour la science

Les trois interactions se combinent dans le Soleil

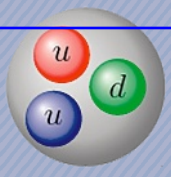
> L'interaction faible gouverne la lente combustion des étoiles en régulant la fusion des protons.

> L'interaction forte est à l'œuvre dans les chaînes de réactions nucléaires qui suivent et qui produisent d'autres noyaux plus lourds ou plus complexes.

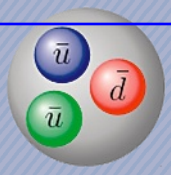
> L'interaction électromagnétique permet la transformation en chaleur et lumière (énergie électromagnétique) de l'énergie créée dans les réactions nucléaires.

La gravité, non expliquée par le modèle standard, est la quatrième interaction essentielle à la bonne marche du Soleil. Elle permet d'atteindre des densités d'hydrogène assez fortes pour combattre la répulsion entre protons.

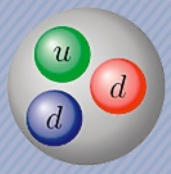
Les hadrons entrent en scène



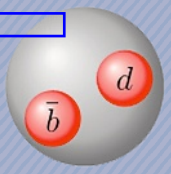
Proton



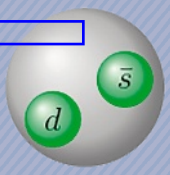
Antiproton



Neutron



Méson B^0



Kaon neutre K

Ni les quarks ni les antiquarks (marqués d'une barre au-dessus de la lettre correspondante) n'existent à l'état libre, car l'interaction forte les lie en permanence dans des particules composites, donc non élémentaires, appelées « hadrons ».

De nombreuses combinaisons sont possibles au sein de deux catégories principales :
> baryon : 3 quarks. Exemples : proton, neutron, antiproton…
> méson : 1 quark + 1 antiquark. Exemples : méson B^0, pion, kaon… *(voir l'article page 72).*

© Lukasz Pawel Szczepanski/shutterstock.com

Les particules hypothétiques qui ne sont pas dans le modèle standard… mais que vous trouverez dans ce numéro !

> Axion *(page 36)*
> Neutrino stérile *(page 26)*
> Leptoquark *(page 72)*
> Boson W' et Z' *(page 72)*
> Neutralino *(page 110)*

Voir où le modèle standard craque pour aller au-delà

Nathalie Besson
est physicienne des particules au CEA-Saclay (DRF/Irfu/DPhP).

> À force d'éliminer tous ses concurrents, le modèle standard est resté seul en course : c'est pour cela qu'il est standard

Modèle standard : pourriez-vous définir de quoi il s'agit ?

Quand on souhaite comprendre quelque chose, par exemple le Système solaire, on fait un modèle, c'est-à-dire une « maquette », avec tout ce que l'on sait du système étudié (les orbites, les satellites, etc.) et les lois qui s'y appliquent (ici, la gravitation suffit). Cela permet de faire des prédictions théoriques : par exemple, la position de Vénus demain soir à 22 h 33. Pour savoir si mon modèle est juste, je compare avec l'expérience et, demain soir, à 22 h 33, j'irai regarder au télescope où se trouve Vénus. C'est cela un modèle : une représentation essentiellement théorique, à un moment donné, qui pourrait être en bois pour le Système solaire, mais qui, en physique des particules, sera formulée en langage mathématique, sous forme d'une grosse équation nommée « lagrangien ». Pourquoi standard ? À force d'éliminer tous ses concurrents, ce modèle est resté seul en course à coller à l'expérience. « Standard » signifie qu'il l'a emporté sur tous les autres, en évoluant pour intégrer toutes les découvertes. Prenez le muon, « cousin » massif de l'électron : on l'attendait si peu que le physicien américain Isidor Isaac Rabi, Prix Nobel en 1944, aurait dit de lui : « Qui a commandé ça ? » Il a fallu ajuster le modèle au muon. *A contrario*, un modèle peut nous dire où chercher. L'équation de Paul Dirac, « ancêtre » du modèle standard, visait juste à décrire, de manière quantique et relativiste, un électron libre. Et il se trouve qu'elle a prédit l'antiélectron, observé quelques années plus tard ! La même chose est arrivée avec le boson de Higgs.

Parlons-en. Cette particule, la dernière du modèle standard à avoir été observée, a-t-elle une place à part ?

Dans les années 1980, quand on a mesuré que les bosons W et Z, vecteurs de l'interaction faible *(voir les Repères, page 6)*, avaient une masse non nulle, le lagrangien a nécessité une

© CERN/Maxglam

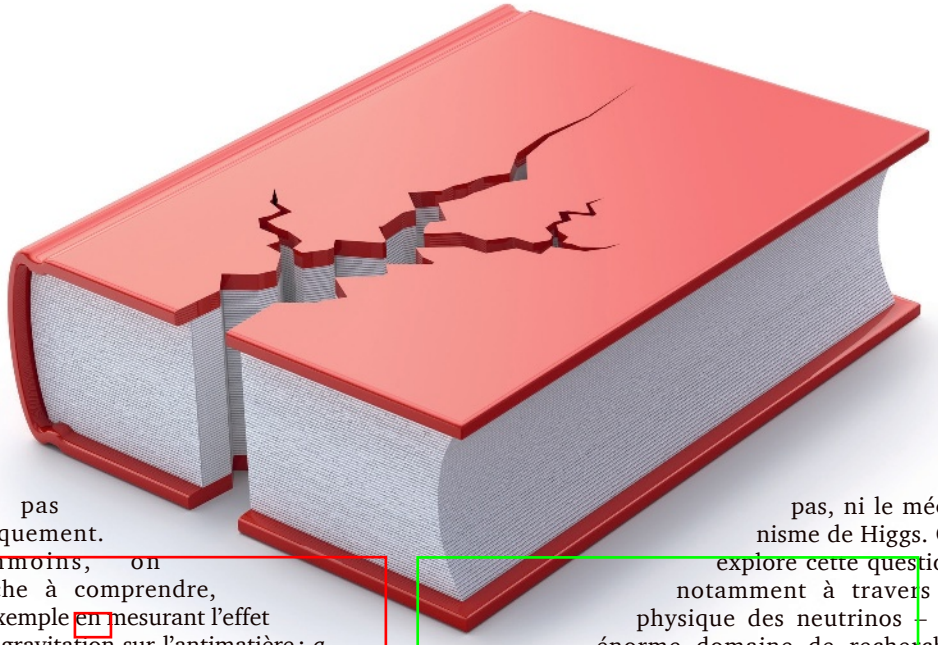
adaptation. La réponse fut le mécanisme de Brout-Englert-Higgs, extraordinairement élégant, qui expliquait comment les bosons pouvaient être massifs alors que le modèle, dans sa version précédente, le leur interdisait. Ce mécanisme prédisait dès les années 1960 l'existence d'un nouveau boson dit « de 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

© Slavoljub Pantelic/shutterstock.com

> 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 !

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.

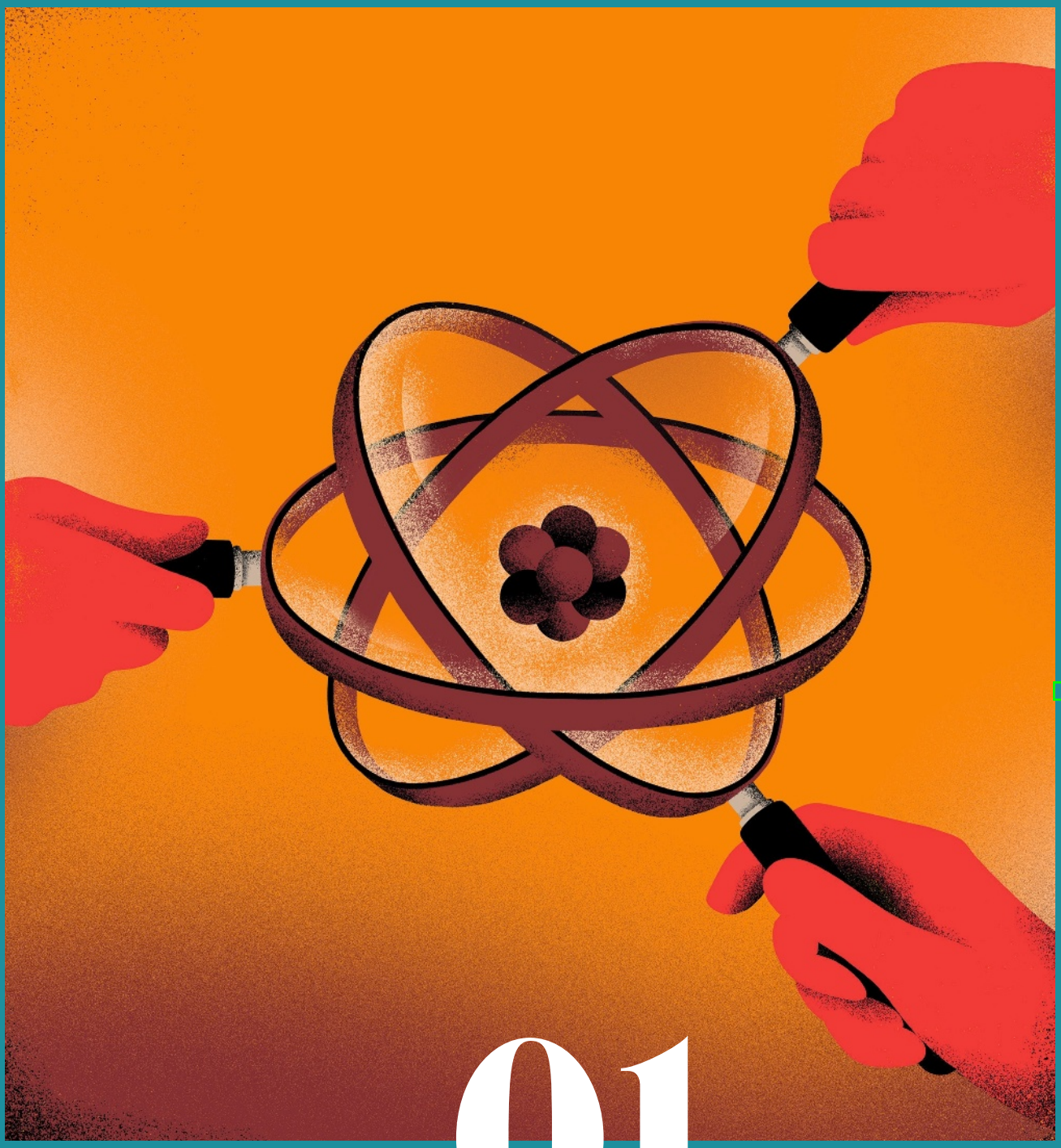
Sommes-nous dans la même situation qu'à la fin du XIXe siècle, avec un édifice qu'on croit presque achevé et quelques anomalies à régler ?

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 XIXe siècle, c'est qu'on n'a pas d'indice : juste des questions ouvertes. Sur l'énergie sombre, expérimentalement, on ne sait par 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

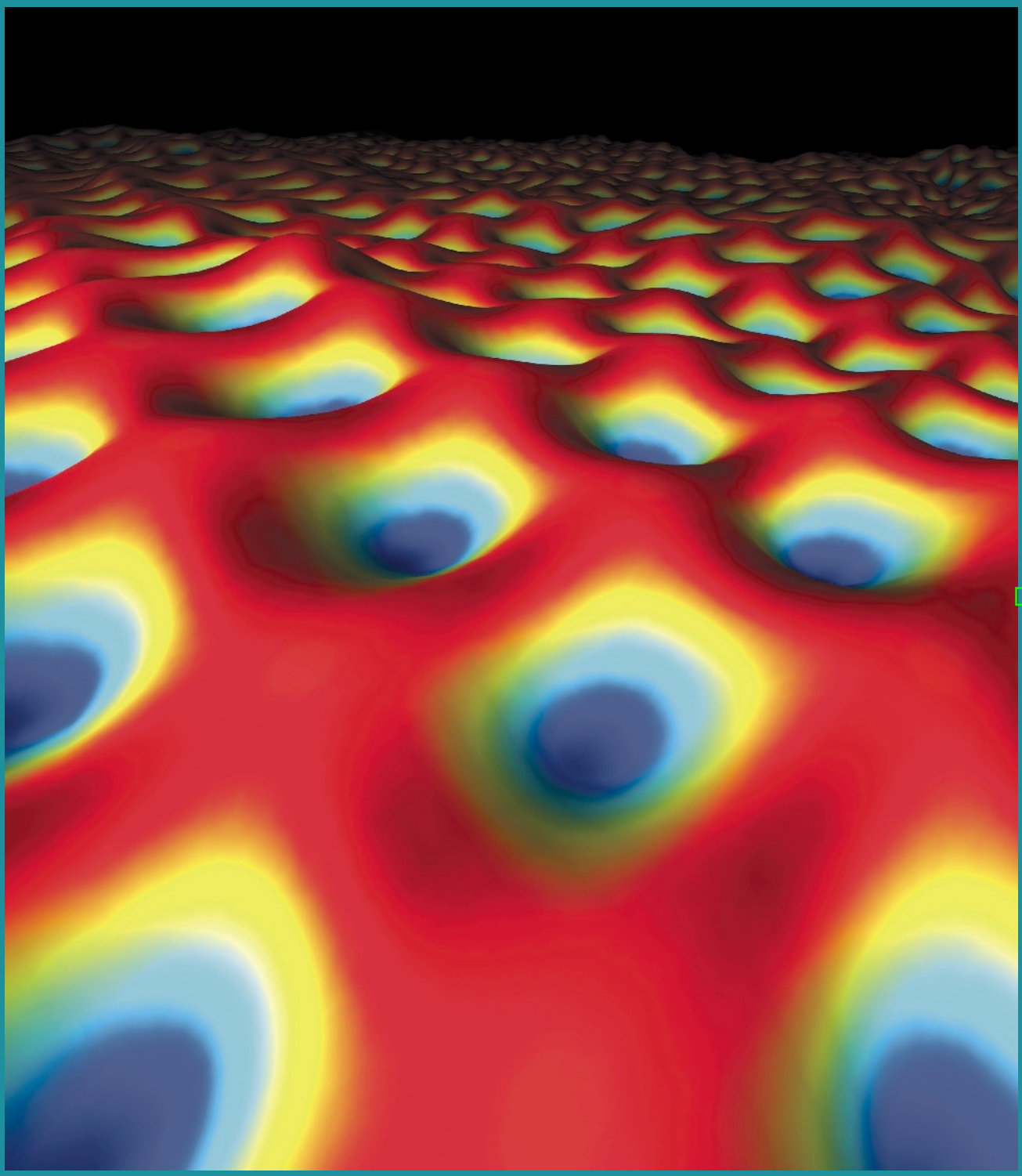
Au-delà des équations, il y a le réel, que la physique décrit parfois de manière déconcertante. Ainsi, à la question : « La matière est-elle faite de particules, de champs ou des deux ? », elle donne… trois réponses !

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.

© Equinox Graphics/Science Source



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, 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.

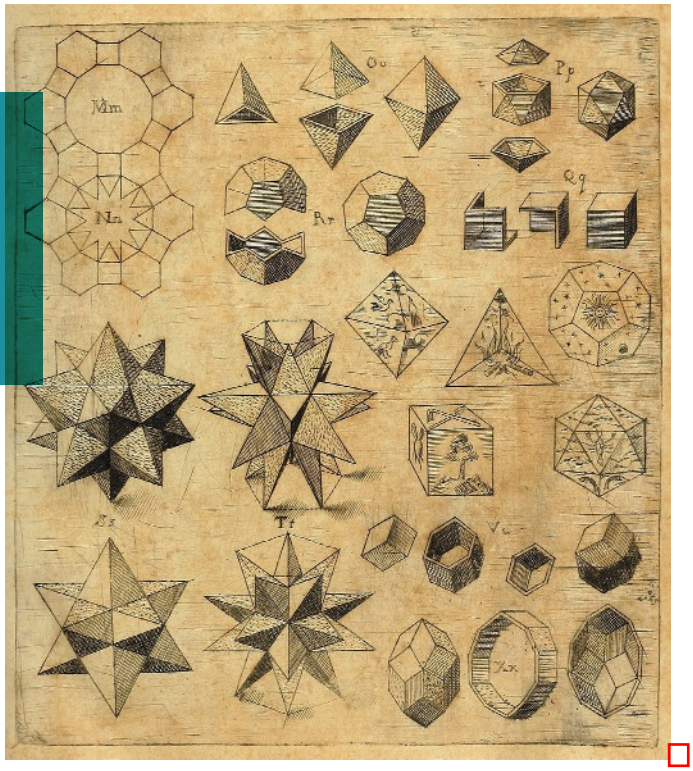
CE QUE LES ÉLECTRONS PERÇOIVENT

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

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.



→ Dans le *Timée*, Platon développe une théorie de la matière inspirée d'Empédocle. Elle postule l'existence de quatre états : la terre sous forme de cubes (6 faces) ; le feu, de tétraèdres (4 faces) ; l'air, d'octaèdres (8 faces) ; et l'eau, d'icosaèdres (20 faces).

l'autre, alors même qu'ils ne se touchent pas. Cette interaction agit à travers le vide séparant les deux électrons. Elle agit aussi à travers un trou dans le temps. Pour être plus précis : chaque électron répond au comportement passé de l'autre, et non à son état actuel. Einstein, opposé à ce genre d'action à distance, comprenait cette interaction différemment. Pour lui, les particules ne sont pas les seuls acteurs en scène. Il y a aussi les champs. Chaque électron produit un champ électromagnétique qui s'étend dans l'espace. Les électrons s'écartent les uns des autres non pas parce qu'ils interagissent directement à travers un vide, mais parce qu'ils perçoivent une force venant du champ de l'autre.

Dans ce cas, les électrons perçoivent-ils les forces de leur propre champ électromagnétique ? Chaque réponse possible amène à un problème. Supposez que l'on réponde oui. Le champ électromagnétique d'un électron est de plus en plus fort à mesure qu'on s'en approche. Si vous imaginez l'électron comme une bille, chaque partie de cette bille ressentira une énorme force dirigée vers l'extérieur, en provenance du champ électromagnétique. Elle devrait donc exploser. Henri Poincaré conjecturait qu'il devait y avoir d'autres forces qui résistaient à cette autorépulsion et qui maintenaient l'intégrité de l'électron – ce qu'on appelle le stress de Poincaré. Si vous considérez que l'électron a la taille d'un point, le problème s'aggrave : champ et force seraient infinis à la position de l'électron.

Maintenant, supposons à l'inverse que l'électron ne perçoive pas le champ qu'il produit. Le problème ici, c'est qu'il y a des preuves montrant que l'électron a « conscience » de son champ. Les particules chargées comme les électrons produisent des ondes électromagnétiques quand elles sont accélérées et, ce faisant, perdent de l'énergie. Si les électrons interagissent avec leur propre champ, nous pouvons correctement calculer le taux auquel ils perdent de l'énergie. Mais dans le cas contraire, la raison pour laquelle ils perdent de l'énergie n'est pas claire du tout.

Dans la proposition de Walther Ritz, fondée uniquement sur les particules et dénuée de champs, l'électron n'interagit pas avec son propre champ parce qu'un tel champ n'existe pas. Chaque électron ne perçoit que les forces venues d'autres particules. Mais, si l'électron n'interagit pas avec lui-même, comment expliquer la perte d'énergie ? Que vous pensiez, comme Einstein, qu'il y a des particules et des champs, ou, comme Ritz, qu'il n'y a que des particules, vous vous retrouvez face à un problème d'auto-interaction.

Ritz et Einstein incarnent deux faces d'un problème qui en comporte en réalité trois : peut-être n'y a-t-il pas de particules, mais seulement des champs. En 1844, Michael Faraday a exploré cette option dans un manuscrit resté inédit, et dans

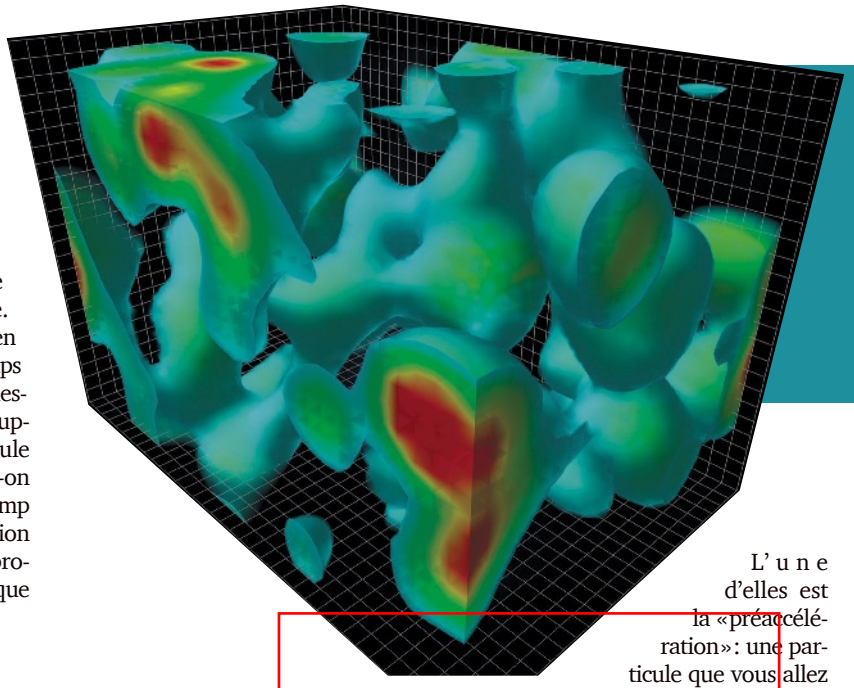
© Wikimedia Commons

une brève note. On peut imaginer qu'il s'agit là de décrire une physique de corps durs et solides, de tailles et formes diverses, entrant en collision et rebondissant entre eux. Cependant, quand deux particules chargées (comme les électrons) interagissent par une attraction ou une répulsion électrique, elles ne se touchent pas vraiment. Chacune ne fait que réagir au champ électromagnétique de l'autre. Les tailles et formes des particules sont sans lien avec l'interaction, sauf si elles modifient les champs entourant les particules. Faraday pose donc la question : « Quelle véritable raison y a-t-il, alors, de supposer qu'il existe un tel noyau dans une particule de matière ? » Autrement dit, pourquoi devrait-on penser qu'il y a un cœur solide au centre du champ électromagnétique d'une particule ? L'interprétation moderne est que Faraday a tout simplement proposé d'éliminer les particules en ne conservant que les champs électromagnétiques.

DES CAS MODERNES

En 2019, au Congrès international de logique, méthodologie et philosophie des sciences et de la technologie, à Prague, j'ai rejoint quatre autres philosophes de la physique pour un débat – laconiquement intitulé « Particules, champs ou les deux ? ». Mathias Frisch, de l'université Gottfried-Wilhelm-Leibniz de Hanovre, a ouvert notre session avec une présentation du débat entre Einstein et Ritz. Puis, les trois autres intervenants ont défendu des opinions opposées – des versions mises à jour des positions d'Einstein, de Ritz et de Faraday.

Le second orateur, Mario Hubert, de l'institut de technologie de Californie, cherchait à délivrer de leur problème d'auto-interaction les particules et champs de la taille d'un point imaginés par Einstein. L'une de ses idées venait de Paul Dirac. Dans un papier de 1938, ce sorcier des mathématiques s'est écarté de la physique quantique pour étudier le problème d'auto-interaction en électrodynamique classique. Il suggérait une modification des lois de l'électrodynamique, qui changerait la façon dont les champs exercent des forces sur les particules. Pour une particule de la taille d'un point, sa nouvelle équation élimine toute interaction avec son propre champ électromagnétique, et inclut un nouveau terme pour imiter le genre d'auto-interaction que nous observons effectivement – le genre qui cause une perte d'énergie chez la particule lorsqu'elle produit des ondes. Toutefois, l'équation que propose Paul Dirac possède d'étranges caractéristiques.



© Derek Leinweber, CSSM, University of Adelaide

L'une d'elles est la « préaccélération » : une particule que vous allez frapper avec une force peut se mettre à bouger avant que vous la touchiez.

Dans les années 1930 et 1940, une stratégie différente a été suivie par quatre physiciens célèbres : Max Born, Leopold Infeld, Fritz Bopp et Boris Podolsky. Ces physiciens proposaient des moyens de changer les lois spécifiant comment les particules produisent des champs électromagnétiques, de sorte que ceux créés par des particules de la taille d'un point ne deviennent jamais infiniment forts.

Quand vous touchez à ces lois, vous changez beaucoup de choses. Comme Mario Hubert l'expliquait dans sa présentation, nous ne comprenons pas totalement les conséquences de ces changements. En particulier, nous ne savons pas avec certitude si les propositions de Born-Infeld et de Bopp-Podolsky seront capables de résoudre le problème d'auto-interaction et de prédire précisément les mouvements des particules.

Vous pourriez penser que toute cette discussion de physique classique nous a bien écartés du sujet. Ne sommes-nous pas supposés tenter de comprendre ce que le modèle standard de physique quantique nous dit à propos de la composition de toute chose ?

La partie du modèle standard qui décrit les électrons et le champ électromagnétique est l'électrodynamique quantique, puisque c'est la version quantique de l'électrodynamique classique. Les fondements des deux sujets sont étroitement liés.

Fondée sur la chromodynamique quantique sur réseau, cette simulation représente les interactions fortes entre quarks et gluons. En physique, la description de l'interaction entre particules est une étape essentielle pour pouvoir prétendre à décrire le réel.

Voici comment Richard Feynman, dans un chapitre de ses célèbres conférences à l'institut de technologie de Californie, justifie sa discussion des modifications de l'électrodynamique classique introduites par Dirac, Born, Infeld, Boop et Podolsky : « Il y a des difficultés associées aux idées de la théorie de Maxwell, qui ne sont pas résolues par, ni directement associées à la mécanique quantique. Vous pourriez dire : peut-être est-ce futile de s'inquiéter de ces difficultés. Puisque la mécanique quantique va changer les lois de l'électrodynamique, nous devrions attendre de voir quelles difficultés demeurent après les modifications. Cependant, quand l'électromagnétisme se joint à la mécanique quantique, les difficultés demeurent. Ce ne sera donc pas une perte de temps de déterminer quelles sont ces difficultés. »

LE FUTUR INFLUENCE LE PASSÉ

En vérité, Feynman pensait que ces problèmes étaient d'une importance majeure. Dans son discours de réception du prix Nobel en 1965 (pour son travail sur l'électrodynamique quantique), il a longuement parlé d'électrodynamique classique. En collaboration avec son directeur de thèse John Wheeler, Feynman a proposé de réimaginer radicalement l'électrodynamique classique.

Tout comme Ritz, John Wheeler et Richard Feynman se débarrassent du champ électromagnétique et ne conservent que les particules. Comme mentionné plus tôt, la théorie sans champs de Ritz voit les particules interagir à travers des vides dans l'espace et le temps de sorte que chaque particule répond aux états passés des autres. Dans la théorie de Wheeler-Feynman, les particules répondent à la fois aux comportements passés et futurs des unes et des autres. Comme dans un film sur les voyages dans le temps, le futur peut influencer le passé. C'est une idée folle, mais qui semble fonctionner. Dans les circonstances appropriées, cette révision conduit à des prédictions correctes à propos des mouvements des particules sans aucune véritable auto-interaction.

Dans une discussion intitulée « Why field theories are not theories of fields » (que l'on peut traduire à peu près comme « les théories sur le champ ne sont pas des théories des champs »), le troisième intervenant de notre débat, Dustin Lazarovici, de l'université de Lausanne, a pris le parti de Ritz, Wheeler et Feynman. Dans les théories de l'action à distance mises en avant par ces physiciens, il est impossible de dire ce qu'une particule fera à un moment particulier simplement en regardant ce que font les autres au même instant. Vous avez aussi besoin de jeter un œil à ce qu'elles faisaient dans le passé (et peut-être à ce qu'elles feront dans le futur). Dustin Lazarovici a soutenu que le champ électromagnétique n'est qu'un simple outil de comptabilité mathématique, certes utile, qui encode cette information à propos du passé et du futur, et non une chose tangible du monde réel.

Il est ensuite passé de l'électrodynamique classique à son équivalent quantique. Comme beaucoup d'autres philosophes de la physique, il pense que les formulations standards de l'électrodynamique quantique sont insatisfaisantes – en partie parce qu'elles ne donnent pas une image claire de ce qui se produit dans la nature. Son programme de recherche pour corriger cette théorie inclut nombre d'éléments non standards.

Ritz et Einstein incarnent deux faces d'un problème qui en a en réalité trois : peut-être n'y a-t-il pas de particules

D'abord, Dustin Lazarovici a conscience que l'électrodynamique quantique souffre de problèmes de mesure quantique, et il pense que nous devrions adopter la solution de David Bohm, qui postule l'existence de particules de la taille d'un point distinctes de la fonction d'onde quantique. Ensuite, il veut bâtir une électrodynamique quantique à partir d'une version de l'électrodynamique classique dépourvue de champs, dans laquelle les particules interagissent directement entre elles (comme celle de Wheeler et Feynman). Enfin, il adopte l'idée controversée de Paul Dirac selon laquelle l'espace est rempli d'une vaste « mer » d'électrons à énergie négative. Cette mer de Dirac était au cœur des recherches précoces en électrodynamique quantique, mais elle a perdu les faveurs de la plupart des présentations contemporaines de la théorie.

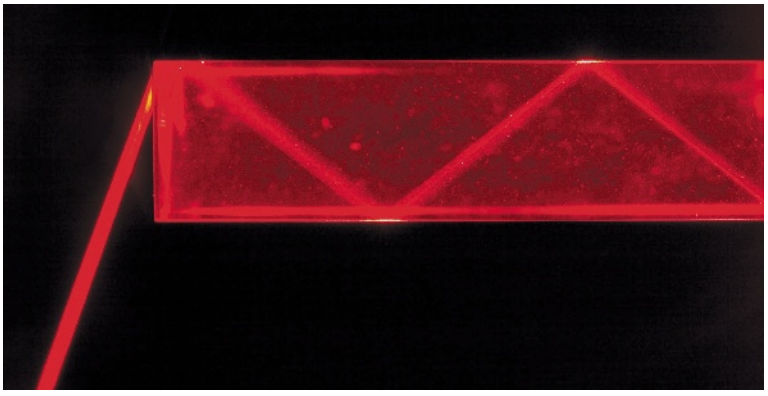
Ces idées s'assemblent bien, et Dustin Lazarovici espère qu'elles nous permettront d'éviter certaines infinités dérangeantes qui apparaissent en électrodynamique quantique. Favorable à des recherches s'écartant du courant dominant, Richard Feynman disait, à la fin de son discours de réception du Nobel, que les progrès en physique viendront peut-être de quelqu'un qui s'enseigne à lui-même « l'électrodynamique quantique à partir d'un point de vue inhabituel et particulier, qu'il aurait à inventer pour lui-même ».

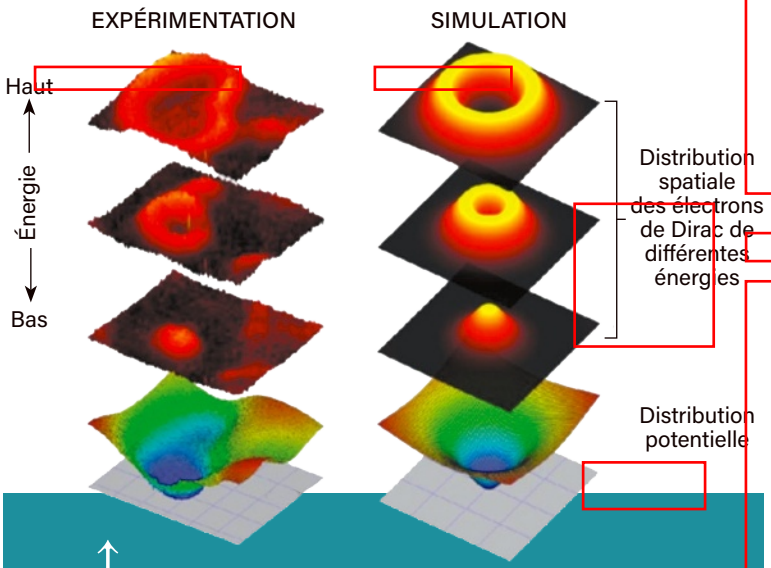
Dans ma contribution au débat, j'ai défendu un point de vue différent sur l'électrodynamique quantique. Marchant dans les pas de Faraday, j'ai soutenu que nous devrions nous débarrasser des particules, et ne garder que les champs. Toutefois, je ne pense pas que le champ électromagnétique seul soit suffisant. Nous avons aussi besoin d'un autre champ : celui de Dirac. C'est lui qui représente l'électron, et aussi son antiparticule, le positron.

DISPERSER LA CHARGE

En électrodynamique classique, cette approche remplace l'électron en forme de particule de la taille d'un point par une quantité éparpillée d'énergie et de charge dans le champ de Dirac. Parce que cette charge est dispersée, le champ électromagnétique qui est produit par elle ne deviendra infiniment fort en aucun point dans l'espace. Cela rend le problème de l'auto-interaction moins grave. Mais il n'est pas résolu. Si la charge de l'électron est subdivisée, pourquoi les différentes parties de l'électron ne se repoussent-elles pas les unes les autres de sorte que l'électron explose ? C'est ce que je cherche à comprendre.

Nous avons vu précédemment ce même problème surgir en supposant que l'électron est une bille. Cependant, la différence est que l'objectif, ici, n'est pas d'inventer un modèle de l'électron, mais plutôt d'en trouver un dans les équations existantes d'électrodynamique quantique.





En 2014, sur un matériau nommé « isolant topologique », des chercheurs japonais ont observé *(à gauche)* puis modélisé *(à droite)* le comportement d'électrons sans masse. Portant le nom d'« électrons de Dirac », ils se comportent comme de purs champs, et non comme des particules.

© GIPhotoStock/Science Source et © Takao Sasagawa ; Y.-S. Fu *et al.*, Nature Physics 10 815.

Le laser qui frappe ce bloc d'acrylique est composé de photons. Dans le cadre de l'électrodynamique quantique, il n'existe aucun mécanisme pour traiter le photon comme une particule. Il convient donc soit de les éliminer, soit de les considérer comme des champs.

Je n'ai pas été conduit à cette image du « tout champ » en étudiant le problème d'auto-interaction, mais par le biais de deux autres considérations. D'abord, j'ai trouvé cette image utile pour comprendre une propriété de l'électron nommée « spin ». La physique quantique standard stipule que l'électron se comporte à maints égards comme un corps en rotation, alors qu'il ne tourne pas vraiment. Son spin n'a donc rien d'une rotation.

Si l'électron a la taille d'un point, il n'y a aucun sens à penser qu'il tourne vraiment. S'il est plutôt pensé comme une très petite bille, on s'inquiète de ce qu'il devrait tourner plus vite que la vitesse de la lumière pour avoir les caractéristiques qui nous ont conduits à utiliser le mot « spin ». Cette inquiétude à propos de la rotation au-delà de la vitesse de la lumière a amené les physiciens découvreurs du spin dans les années 1920 à publier leurs résultats avec une certaine gêne.

Si l'électron est une quantité suffisamment éparpillée d'énergie et de charge dans le champ de Dirac, nul mouvement plus rapide que la lumière n'est nécessaire. Nous pouvons étudier si l'énergie et la charge s'écoulent de façon circulaire autour d'un axe central – en somme, constater si l'électron tourne. C'est bien le cas.

La deuxième considération qui m'a conduit à cette image du « tout champ » fut la prise de conscience que, en électrodynamique quantique, nous n'avons pas le moyen de traiter le photon comme une particule. Paul Dirac a inventé une équation qui décrit le comportement quantique d'un seul électron. Mais nous n'avons rien de tel pour le photon.

Si vous considérez les électrons comme des particules, vous devrez considérer les photons différemment – soit en les éliminant (la version de Lazarovici), soit en les traitant comme un champ (la version de Hubert). D'un autre côté, si vous voyez les électrons comme un champ, alors vous pouvez considérer les photons de la même manière. Je perçois cette cohérence comme une vertu de l'approche « tout champ ».

À l'heure actuelle, le problème à trois faces entre Einstein, Ritz et Faraday demeure irrésolu. Nous avons certainement progressé, mais nous n'avons pas de réponse définitive. Ce que l'électrodynamique classique et son équivalent quantique nous apprennent de la réalité n'est pas encore clair. De quoi sont faites toutes choses ? De particule, de champs ou des deux ?

Cette question n'est pas au centre de la recherche en physique contemporaine. Les physiciens théoriciens pensent généralement que nous avons une assez bonne compréhension de l'électrodynamique quantique pour continuer, travailler au développement de nouvelles théories et trouver des moyens de les tester par le biais d'expériences et d'observations.

Telle pourrait être la voie qui s'ouvre devant nous. Toutefois, le progrès en physique nécessite parfois de rebrousser chemin pour réexaminer, réinterpréter et réviser les théories que nous avons déjà en stock. Pour mener ce genre de recherche, nous avons besoin de savants qui mélangent les rôles de physiciens et de philosophes, comme c'était le cas, il y a quelques milliers d'années, dans la Grèce de Platon.

— L'auteur —

> Charles T. Sebens est professeur assistant de philosophie à l'institut de technologie de Californie, à Pasadena.

Cet article a paru en anglais sous le titre « What's everything made of ? » dans *American Scientist* (janvier-février 2020).

— À lire —

> C. T. Sebens, How electrons spin, *Studies in History and Philosophy of Science, Part B : Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, vol. 68, pp. 40-50, 2019.

> D. Lazarovici, Against fields, *European Journal for Philosophy of Science*, vol. 8, pp. 145-170, 2018.

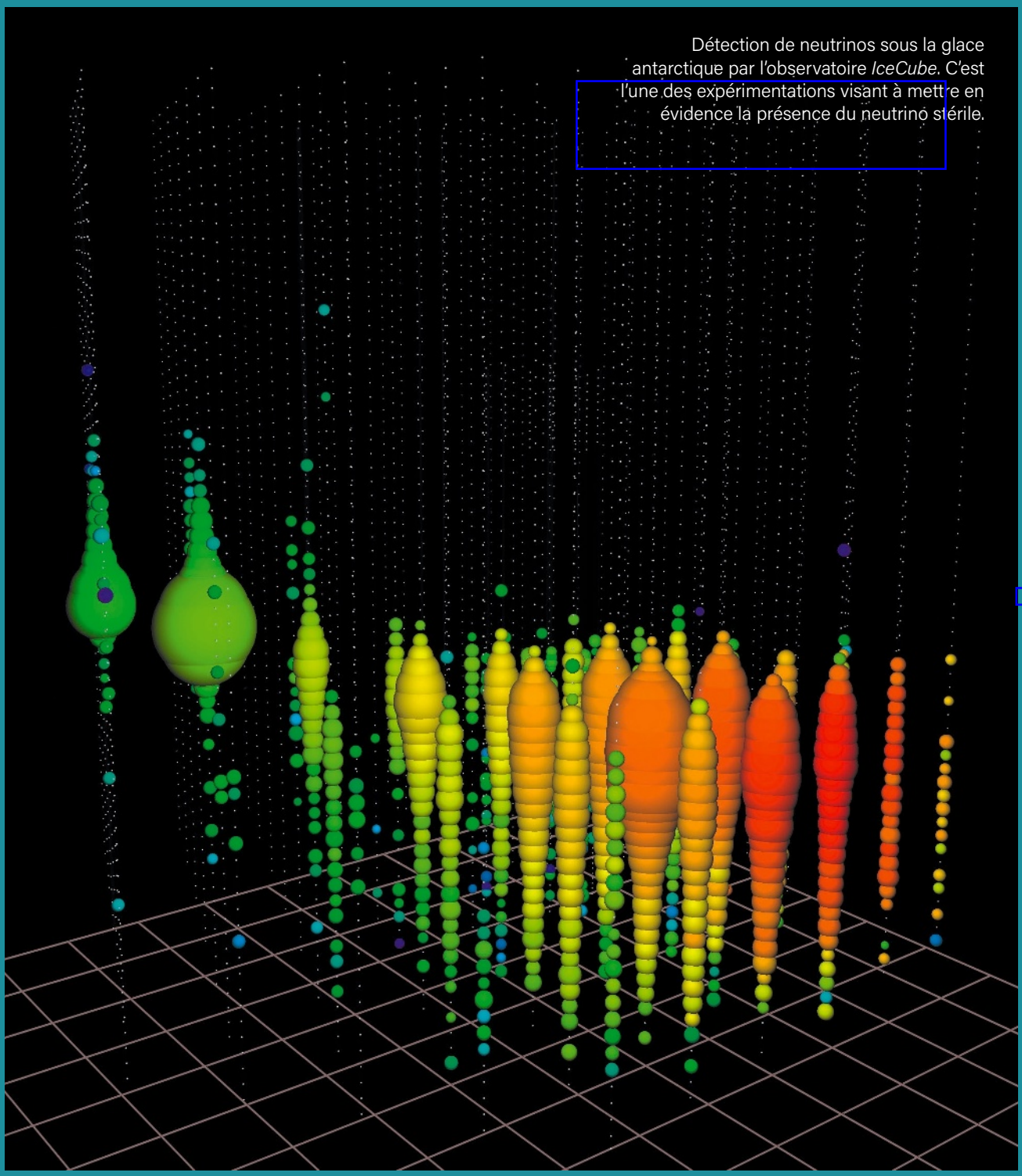
> R. P. Feynman, The development of the space-time view of quantum electrodynamics, *Discours de réception aux prix Nobel*, 1965. https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1965/feynman/lecture/

Les neutrinos existent en trois variétés. L'existence d'une quatrième, surnommée « neutrino stérile », fait débat. Si cette particule existe, elle ouvrira une porte sur le « secteur sombre » de la physique.

La possible fécondité du neutrino stérile

William Charles Louis et Richard Van de Water

© IceCube collaboration



Détection de neutrinos sous la glace antarctique par l'observatoire *IceCube*. C'est l'une des expérimentations visant à mettre en évidence la présence du neutrino stérile.

Les physiciens venus assister à notre présentation lors de la Conférence internationale de 2010 sur les neutrinos, à Athènes, s'attendaient sans doute à ce que nous enterrions définitivement les résultats controversés que nous avions annoncés une décennie auparavant. Au lieu de cela, notre prestation fut accueillie par un silence gêné.

L'histoire commence en 1996, lorsque nous publiâmes des données obtenues à l'aide du *LSND* (scintillateur liquide pour la détection des neutrinos) au laboratoire de Los Alamos. Ces résultats semblaient remettre en question l'assertion largement admise selon laquelle il n'existe que trois types ou « saveurs » de neutrinos – ces minuscules particules omniprésentes qui traversent sans encombre la matière. Les données suggéraient qu'il pourrait exister une quatrième saveur de neutrinos encore à détecter. Cependant, une autre expérience similaire menée en Europe, *Karmen*, avec une sensibilité comparable, ne révélait rien d'anormal.

La communauté scientifique se montra sceptique et, il faut être juste, les données préliminaires des expériences visant à reproduire nos résultats suggéraient qu'ils étaient erronés, c'est-à-dire qu'il n'y avait finalement pas de quatrième saveur de neutrinos. Ce jour-là, à Athènes, l'auditoire s'attendait donc logiquement à ce que nous enfoncions le dernier clou dans le cercueil des faux signaux du *LSND*. Ce que nous annonçâmes au contraire, c'est qu'avec le temps les indices en faveur de l'existence de la quatrième saveur de neutrino sont devenus plus convaincants.

Certes, nous n'avions pas découvert la particule. Mais les travaux que nous présentions, réalisés dans le cadre de l'expérience *MiniBooNE*, au Fermilab de Batavia, dans l'Illinois, suggéraient que quelque chose était erroné dans notre modèle actuel de la physique des particules. Nous affirmions qu'une des solutions les plus vraisemblables était l'existence d'un nouveau neutrino – un neutrino dit « stérile », parce qu'incapable d'interagir de quelque manière que ce soit avec la matière excepté *via* la gravitation. Au cours des dix ans qui ont suivi notre présentation en Grèce, les données de *MiniBooNE* n'ont fait qu'appuyer davantage les arguments en faveur de cette quatrième saveur de neutrinos.

Nous sommes désormais certains d'observer quelque chose qui dépasse le cadre de la physique connue, et les neutrinos stériles figurent parmi les favoris pour l'expliquer. L'idée que nos expériences pourraient être en train de détecter un quatrième neutrino reste cependant controversée, parce que le modèle standard de la physique des particules est l'une des théories les mieux testées et confirmées de l'histoire… et qu'il n'autorise que trois saveurs de neutrino.

Cependant, nous savons pertinemment que le modèle standard est incomplet puisqu'il n'explique ni la matière noire ni l'énergie sombre, entités qui semblent pourtant constituer l'essentiel du contenu de l'Univers. Or une nouvelle saveur de neutrinos pourrait bien être le chaînon manquant entre la physique connue et ce royaume obscur. Après des décennies d'incertitude, les physiciens mettent enfin sur pied de nouveaux projets expérimentaux, dont notre détecteur *CCM* (ou *Coherent CaptainMills*), grâce auxquels ils résoudront peut-être le problème.

En bref

> Les neutrinos existent en trois « saveurs ». Certaines expériences laissent aujourd'hui entrevoir la possibilité d'une quatrième saveur – un neutrino dit « stérile », insensible aux interactions fondamentales autres que la gravitation.

> Si les neutrinos stériles existent, ils pourraient fournir une piste pour aller au-delà du modèle standard de la physique des particules et pour comprendre le « secteur sombre » de l'Univers, c'est-à-dire la matière noire et l'énergie sombre.

> Plusieurs expériences, notamment avec le détecteur *CCM* au Laboratoire américain de Los Alamos, sont conçues pour tester l'hypothèse de l'existence de neutrinos stériles.

> Véritables fantômes, les neutrinos sont des milliers de milliards à traverser votre corps à chaque seconde. Le neutrino stérile serait le plus fantomatique de tous

Les neutrinos sont des particules fantomatiques. Ils sont ainsi des milliers de milliards à traverser votre corps à chaque seconde, presque à la vitesse de la lumière. Mais le neutrino stérile serait le plus fantomatique de tous. Insensible aux interactions faible, forte et électromagnétique auxquelles sont soumises les autres particules, il serait indétectable. De ce fait, il serait un composant de ce que les physiciens nomment le «secteur sombre», auquel appartiennent la matière noire et l'énergie sombre, qui constituent 95% de la densité d'énergie de l'Univers. Il se pourrait que les neutrinos stériles soient capables d'interagir avec la matière noire *via* de nouvelles forces de la nature. Ces particules pourraient même être une composante de la matière noire: selon certaines hypothèses, des neutrinos stériles (de masse cependant supérieure à celle des neutrinos recherchés par *MiniBooNE* et *CCM*) représenteraient une fraction appréciable, voire l'essentiel, de la matière invisible du cosmos.

UN PROBLÈME AVEC LE SOLEIL

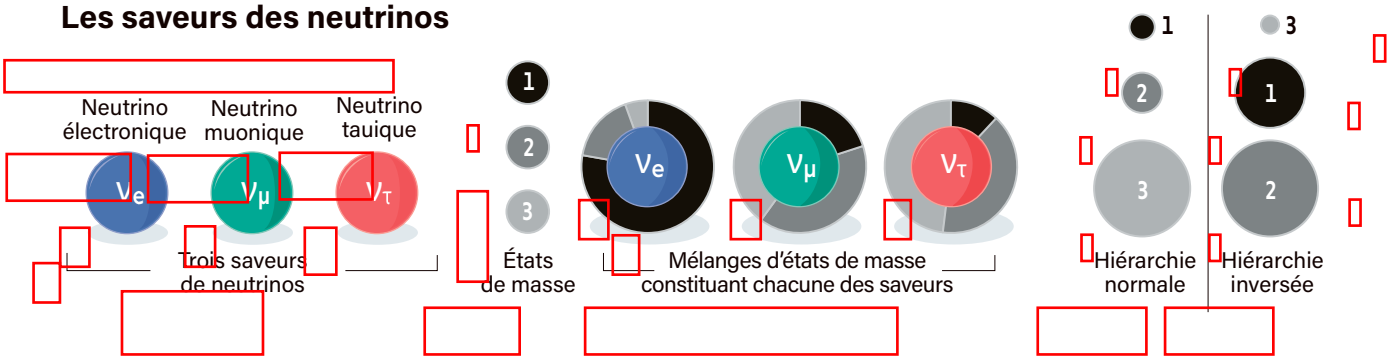
L'existence des neutrinos stériles ne serait que la dernière d'une longue série de surprises venant de cette intrigante famille de particules. La première date des années 1960, lorsque des expériences destinées à mesurer le flux de neutrinos émis dans notre direction par le Soleil détectaient systématiquement beaucoup moins de particules que ne le prévoyaient les scientifiques. Toutes les étoiles sont alimentées par des réactions de fusion thermonucléaire au cours desquelles des protons fusionnent et forment des noyaux d'hélium, lesquels fusionnent à leur tour pour former des éléments plus lourds. Les neutrinos électroniques (l'une des trois saveurs de neutrinos, aux côtés des neutrinos muoniques et tauiques) figurent parmi les sous-produits de ces réactions. La théorie permettait de calculer le flux continu de ces particules qui devait atteindre les détecteurs sur Terre. Or on ne détectait qu'une fraction du nombre attendu. C'était le fameux «problème des neutrinos solaires».

Au départ, beaucoup de physiciens ont supposé que nous comprenions simplement mal le fonctionnement du Soleil. La réalité s'est révélée bien plus simple et nettement plus intéressante. Le Soleil n'émettait pas moins de neutrinos que prévu. C'étaient en fait lesdits neutrinos qui n'arrivaient pas jusqu'à nos détecteurs sur Terre. Pour être plus exact, ils s'étaient transformés en chemin.

Les physiciens ont fini par comprendre que les neutrinos ne sont pas des entités physiques «pures». Chaque neutrino est plutôt un mélange des différentes saveurs et il peut passer d'une saveur à l'autre au cours du temps. Ce phénomène appelé «oscillation» fut une surprise pour plusieurs raisons. Pour commencer, le fait que les neutrinos soient susceptibles de changer de saveur implique qu'ils ne sauraient être les particules de masse nulle et voyageant à la vitesse de la lumière prédites par le modèle standard.

Une façon de le comprendre est de se rappeler que, conformément à la théorie de la relativité restreinte d'Einstein, le temps s'écoule plus lentement pour un objet en mouvement que pour un objet immobile. Plus un objet va vite, plus son horloge ralentit (par rapport à une horloge immobile) jusqu'à s'arrêter complètement si l'objet se déplace à la vitesse de la lumière. Cela signifie que si vous pouviez voyager à la vitesse de la lumière, le temps

Les saveurs des neutrinos



Il existe trois types ou « saveurs » de neutrino : le neutrino électronique, le neutrino muonique et le neutrino tauique. Ces saveurs sont des états constitués en réalité d'un mélange de trois « états de masse » possibles. On ne connaît pas encore la valeur exacte de ces trois masses, à part le fait qu'elles sont toutes très petites. La théorie suggère deux possibilités : soit les deux premières sont exceptionnellement faibles et la troisième légèrement plus élevée, soit au contraire l'une est extraordinairement petite et les deux autres un peu plus grandes.

vous paraîtrait s'arrêter et l'Univers se figer sur place. Or si la saveur des neutrinos n'est pas fixe, c'est qu'ils subissent un changement et donc qu'ils ressentent le passage du temps. Ils voyagent donc nécessairement à une vitesse inférieure à celle de la lumière. Par suite, ils ne peuvent pas être dépourvus de masse. Selon la relativité restreinte, les particules de masse nulle voyagent à la vitesse de la lumière : si les neutrinos sont plus lents, c'est qu'ils en ont une, même très faible. Cela signifie aussi que le modèle standard de la physique des particules est à tout le moins incomplet. Cette révélation et la découverte de l'oscillation des neutrinos ont valu le prix Nobel en 2015 au Japonais Takaaki Kajita et au Canadien Arthur McDonald.

DES SIGNAUX SURPRENANTS

Dans les années 1990 et 2000, nous étudiions précisément cette capacité inattendue qu'ont les neutrinos à changer de saveur au sein des expériences *LSND* et *MiniBooNE*. C'est alors que les indices de l'existence d'un neutrino supplémentaire ont commencé à apparaître de façon récurrente. Dans les deux dispositifs, un accélérateur de particules produisait un jet continu de neutrinos muoniques et, dans les deux cas, des détecteurs réglés pour capter des neutrinos électroniques (plus précisément des antineutrinos pour *LSND*) étaient placés à une certaine distance de la source de neutrinos muoniques.

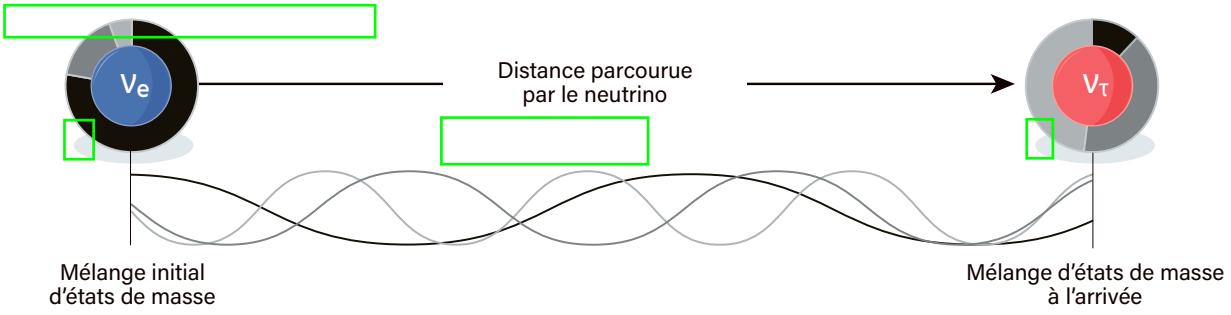
Si vous pouviez voler aux côtés d'un neutrino tandis qu'il file à travers l'espace, vous le verriez « osciller », c'est-à-dire passer par les trois saveurs de façon cyclique. Les saveurs électronique, muonique et tauique seraient toutes les trois observables, du moins en principe. Cependant, si la saveur stérile existe, votre neutrino pourrait aussi l'adopter. Pour l'observateur qui l'accompagnerait, la particule semblerait simplement disparaître sur un segment de sa trajectoire. Dans le cas le plus simple, le neutrino réapparaîtrait un peu plus loin en retrouvant une des trois saveurs ordinaires (même s'il est théoriquement possible que le neutrino stérile puisse se désintégrer, mettant ainsi fin aux oscillations).

En général, les oscillations d'une des trois saveurs connues à une autre se déroulent sur de longues distances. Mais comme les neutrinos stériles sont très probablement plus lourds que ceux des saveurs habituelles, les particules pourraient osciller vers cet état plus vite et, inversement, en revenir pour adopter l'un des trois types connus sur des distances plus courtes. Ainsi, si les neutrinos stériles existent, leur effet pourrait être d'accélérer le processus d'oscillation et de raccourcir considérablement la distance qu'un neutrino muonique, par exemple, devra parcourir avant de se transformer en neutrino électronique.

C'est exactement ce que nous avons observé lors de nos premières expériences : il semblait que les neutrinos muoniques disparaissaient

© Lucy Reading-Ikkanda

Des saveurs qui oscillent



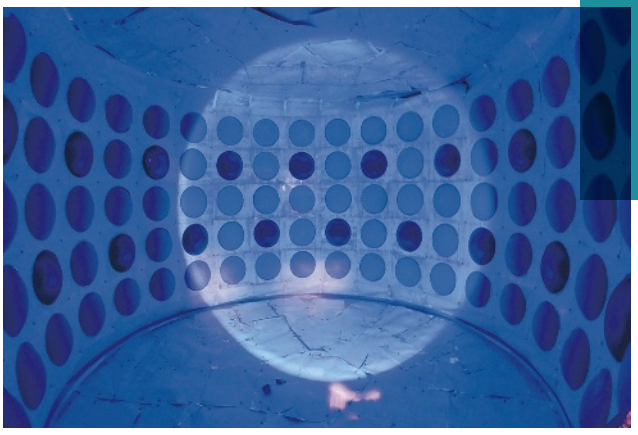
Lorsque les neutrinos se déplacent, les différents états de masse qui les constituent se propagent à des vitesses légèrement différentes. Avec le temps, ces écarts modifient le mélange d'états de masse du neutrino et le font donc changer de saveur – un processus nommé « oscillation ». Ainsi, une particule qui démarre sous la forme d'un neutrino électronique peut arriver sous la forme d'un neutrino tauique.

bien plus vite que prévu au cours de leur voyage depuis la source et que les neutrinos électroniques apparaissaient dans le détecteur en plus grand nombre qu'on ne l'attendait. Nous observions des oscillations sur des distances de quelques centaines de mètres seulement au lieu des quelques centaines de kilomètres prévus. Des neutrinos muoniques en aussi grand nombre n'auraient pas dû pouvoir se transformer en neutrinos électroniques sur une distance aussi courte que celle de l'expérience, à moins peut-être qu'ils ne se soient changés en autre chose en chemin.

Ces anomalies n'apparaissent pas uniquement dans nos expériences. Les données de certains détecteurs placés à proximité de réacteurs nucléaires (par exemple dans l'expérience franco-allemande *Stereo*, à Grenoble, ou l'expérience *Nucleus*, auprès du réacteur de Chooz, en France) suggèrent également que quelque chose cloche. Tout comme le Soleil, un réacteur nucléaire produit des neutrinos, et plusieurs dispositifs expérimentaux ont été placés à leur voisinage pour étudier ces particules. En général, ils détectent moins de neutrinos que prévu, ce qui suggère qu'une partie d'entre eux a pu se changer en neutrinos stériles au cours du trajet depuis le réacteur. Ces résultats sont cependant difficiles à interpréter, car les physiciens ne savent pas exactement combien de neutrinos sont produits par un réacteur à fission. La détection d'un plus faible nombre de neutrinos peut donc être due soit à l'existence du neutrino stérile, soit à une surestimation par les scientifiques de la quantité de neutrinos qu'ils devraient détecter.

Des physiciens en Russie contournent cette incertitude avec une expérience nommée *DANSS* (acronyme anglais pour « détecteur des antineutrinos du réacteur par un scintillateur solide en plastique »). Le dispositif est installé sous un réacteur nucléaire, mais les scientifiques font varier la distance entre le réacteur et le détecteur de neutrinos tous les quelques jours, de façon à vérifier si les neutrinos changent bien de saveur en cours de route. Cette approche est susceptible de révéler aux chercheurs s'il existe des oscillations à courte distance, même s'ils ne disposent pas d'une estimation précise du nombre de neutrinos produits par le réacteur. Par ailleurs, l'expérience franco-allemande *Stereo* teste également les oscillations à courte distance, le détecteur étant distant de 10 mètres seulement du réacteur.

L'énorme observatoire de neutrinos *IceCube*, installé en Antarctique, recherche lui aussi le neutrino stérile. Ce réseau de photodétecteurs enterrés dans la glace polaire et occupant un volume total de 1 kilomètre cube décèle le « rayonnement Tcherenkov », une émission de lumière produite lorsqu'un neutrino très énergétique provenant de la haute atmosphère interagit avec la glace et crée une cascade de particules. L'étude des signaux Tcherenkov recueillis par les photodétecteurs permet aux scientifiques de reconstituer le



← Vue de l'intérieur du détecteur *CCM*, au Laboratoire américain de Los Alamos. Les disques sont des tubes photomultiplicateurs.

type, l'énergie et la trajectoire du neutrino incident. L'équipe d'*IceCube* recherche les signes d'une disparition des neutrinos muoniques qui, si elle est confirmée, serait cohérente avec les résultats de *LSND* et de *MiniBooNE* et pourrait donc indiquer l'existence du neutrino stérile.

Tous les indices en faveur du neutrino stérile sont certes intrigants et encourageants, mais ils ne permettent pas encore de conclure. La gamme d'énergies des neutrinos étudiés par *IceCube* est large, ce qui complique l'analyse des oscillations. Il est également difficile de distinguer, dans les expériences réalisées à proximité de réacteurs nucléaires, les neutrinos émis par les réactions de ceux issus de désintégrations radioactives au sein du matériel de détection.

Dans les expériences *LSND* et *MiniBooNE*, on peut certes allumer et éteindre l'accélérateur de particules pour déterminer l'intensité du bruit de fond. Mais nous avons été limités en partie par l'impossibilité de chercher les neutrinos à différentes distances de la source. Cela revient à ne prendre qu'une image d'un film, quand il nous faudrait une succession d'images pour connaître toute l'histoire.

UNE NOUVELLE STRATÉGIE

La nouvelle génération d'expériences en cours ou qui se mettent en place devrait nous permettre d'obtenir la succession d'images dont nous avons besoin. L'idéal, comme nous l'avons évoqué plus haut, serait de pouvoir voler aux côtés d'un neutrino et d'observer ses oscillations. C'est bien sûr impossible, mais ces expériences nous permettent de saisir des instantanés à différents moments de l'oscillation, ce qui est susceptible de faire apparaître la saveur stérile, si elle existe. Parmi ces projets, on trouve le programme *Short-Baseline Neutrino*, au Fermilab, et l'expérience *CCM*, que nous avons mis en route à Los Alamos.

Le dispositif *CCM* est installé dans le hall du Lansce, le Centre de science neutronique de Los Alamos, au bout d'un accélérateur de particules de 800 mètres de long. L'accélérateur produit un faisceau de protons qui est dirigé sur une cible en tungstène. En frappant le métal, les protons expulsent de ses atomes des cascades de neutrons selon un mécanisme appelé « spallation ». Une partie de l'énergie libérée par ce processus conduit à la création de particules éphémères, des pions. Ces dernières s'immobilisent et se désintègrent rapidement en un muon et, plus important pour nous, en un neutrino muonique d'une énergie bien déterminée.

CCM détectera ces neutrinos grâce à ce que l'on appelle la « diffusion cohérente », qui repose sur le fait que toutes les particules (neutrinos compris) se comportent non seulement comme de petits corpuscules, mais aussi comme des ondes. Cette dualité onde-corpuscule est un des fondements de la mécanique quantique. La longueur d'onde associée à une particule dépend de son énergie. Les particules de haute énergie, très rapides, ont de petites longueurs d'onde, tandis que les particules de faible énergie, lentes, ont de plus grandes longueurs d'onde.

Lorsque des neutrinos de courte longueur d'onde frappent un noyau atomique, ils n'interagissent qu'avec un seul nucléon (proton ou neutron) en son sein. Mais quelque chose de particulier se passe lorsque l'énergie d'un neutrino est assez basse pour que sa longueur d'onde soit comparable au diamètre du noyau atomique. Au lieu de ne frapper qu'un seul proton ou un seul neutron dans l'atome, le neutrino de faible énergie interagit avec le noyau tout entier. On peut comparer cela à l'arrivée de la houle sur un bateau. Une houle courte n'aura pratiquement aucun effet sur le mouvement d'un très grand navire, alors qu'une

© Los Alamos National Laboratory

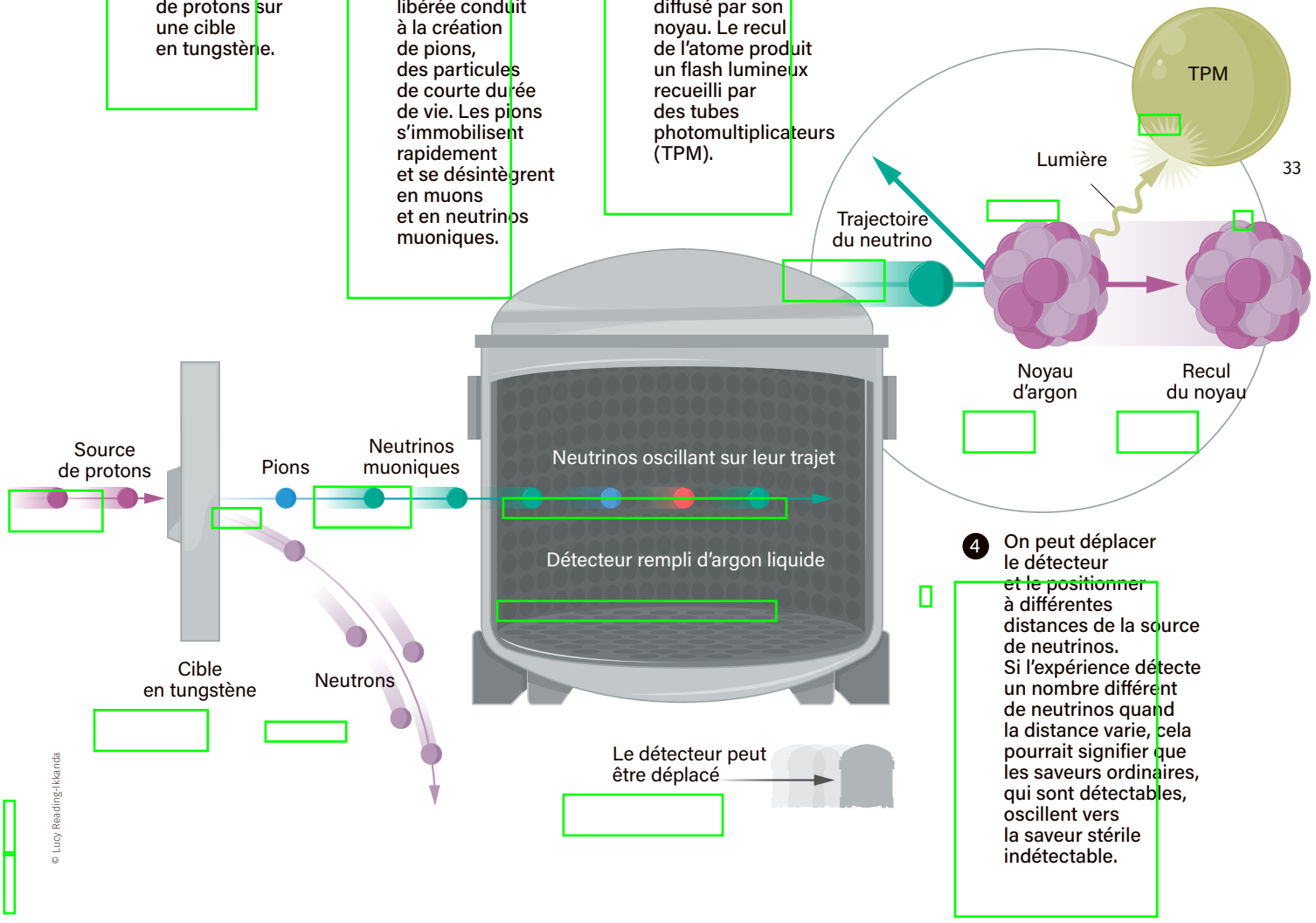
LES NEUTRINOS EN ACTION

L'expérience *CCM* (ou *Coherent Captain-Mills*), au Laboratoire américain de Los Alamos, recherche des indices de l'existence d'une quatrième saveur de neutrino, les neutrinos stériles. Au contraire des trois saveurs connues, qui interagissent peu avec les autres particules, les neutrinos stériles n'interagiraient pas du tout, sauf par le truchement de la gravitation (et du phénomène d'oscillation d'une saveur à l'autre). Si les neutrinos stériles existent, les neutrinos ordinaires pourraient osciller vers cette forme puis reprendre l'une des trois saveurs connues. L'expérience ne serait pas en mesure de détecter ces neutrinos stériles, mais noterait une diminution du nombre de neutrinos détectés à différentes distances, indiquant ainsi que des neutrinos « normaux » se sont transformés en leur cousin stérile.

1 Un accélérateur de particules de 800 mètres de long envoie un faisceau de protons sur une cible en tungstène.

2 Les protons expulsent des atomes des neutrons. Une partie de l'énergie libérée conduit à la création de pions, des particules de courte durée de vie. Les pions s'immobilisent rapidement et se désintègrent en muons et en neutrinos muoniques.

3 Lorsqu'un neutrino frappe un atome d'argon dans le détecteur de l'expérience, il est diffusé par son noyau. Le recul de l'atome produit un flash lumineux recueilli par des tubes photomultiplicateurs (TPM).



4 On peut déplacer le détecteur et le positionner à différentes distances de la source de neutrinos. Si l'expérience détecte un nombre différent de neutrinos quand la distance varie, cela pourrait signifier que les saveurs ordinaires, qui sont détectables, oscillent vers la saveur stérile indétectable.

© Lucy Reading-Ikkanda

houle longue en plein océan le soulèvera considérablement. Puisqu'un neutrino de grande longueur d'onde voit le noyau atomique comme un tout et non comme une collection de petites parties, la probabilité qu'il interagisse est bien plus grande.

UN MINUSCULE FLASH DE LUMIÈRE

Contrairement aux neutrinos de haute énergie, un neutrino de basse énergie rebondit donc sur le noyau tout entier. Cette diffusion est dite «cohérente» parce que la longueur d'onde du neutrino est comparable à la taille du noyau. Le noyau subit alors un recul. Et si cette interaction a lieu dans le matériau adéquat, le recul de l'atome produit un minuscule flash de lumière, tandis que le neutrino continue sa route dans une nouvelle direction. En captant le flash lumineux à l'aide d'un détecteur à tubes photomultiplicateurs, on peut déterminer où et quand le neutrino a été diffusé par l'atome ainsi que l'énergie cinétique de ce dernier. Même si la diffusion cohérente ne permet pas de révéler la saveur d'un neutrino donné, elle permet de mesurer le nombre total de neutrinos des trois saveurs qui ont interagi avec le détecteur. Ce point est très important : si cette somme ne correspond pas au nombre de neutrinos attendus, il se peut que des neutrinos stériles indétectés – parce qu'ils ne pourraient pas interagir avec les atomes d'argon et ne produiraient donc pas de flash lumineux – soient impliqués.

Puisque les chances qu'un neutrino soit diffusé par un noyau entier sont supérieures à celles de le voir interagir avec un seul de ses nucléons, on peut se permettre d'utiliser des détecteurs plus petits que les gros appareillages autrefois nécessaires à la plupart des détecteurs de neutrinos (il en est de même avec les détecteurs placés près de réacteurs nucléaires, le flux de neutrinos étant alors très intense).

Le détecteur de *CCM* contient 10 tonnes d'argon liquide, à comparer à la cuve de 800 tonnes d'huile minérale du détecteur de l'expérience *MiniBooNE*. Et comme il est compact, on peut le déplacer d'un endroit à un autre afin de détecter les neutrinos à différentes distances de leur source. Si les neutrinos oscillent assez fréquemment sur les quelques dizaines de mètres disponibles dans le hall d'expériences du Lansce, nous observerons une variation du nombre total de détections en fonction de la distance. Un tel résultat indiquerait qu'il se produit effectivement des oscillations vers la saveur stérile : en effet, s'il n'existe que trois saveurs seulement, nous ne devrions pas observer d'oscillation sur de si courtes distances.

Il est bien sûr possible que *CCM* ne décèle rien de tel. Dans ce cas, le nombre de neutrinos normaux observé diminuera simplement à mesure que nous éloignerons le détecteur de la cible en tungstène, exactement comme l'éclat apparent d'une lampe diminue à mesure que l'on s'en éloigne.

Bien que décevant, un tel résultat n'exclurait pas l'existence d'un ou plusieurs neutrinos stériles, mais il permettrait de fixer des limites à leurs propriétés potentielles. Comme les oscillations des neutrinos dépendent de leurs masses relatives et d'un paramètre nommé «angle de mélange», le fait de ne pas trouver de signe du neutrino stérile nous permettra de mettre le doigt sur les valeurs que ces masses et ces angles de mélange ne peuvent en aucun cas avoir, réduisant ainsi la plage de paramètres que les chercheurs devront considérer.

Les expérimentateurs qui présentent des résultats en désaccord avec le modèle standard sont présumés coupables jusqu'à ce qu'ils prouvent leur innocence, pour la bonne raison que, historiquement, les scientifiques qui ont remis en cause le modèle standard ont eu tort. Néanmoins, l'existence d'une physique au-delà du modèle est certaine ; à elle seule, l'oscillation des neutrinos en est une preuve. Si le sujet reste controversé, les nouvelles expériences sont désormais sur le point de résoudre le problème – d'une façon ou d'une autre.

— **Les auteurs** —

> William Charles Louis est physicien au Laboratoire national de Los Alamos (LANL), dans le Nouveau-Mexique, aux États-Unis.

> Richard Van de Water est physicien au Laboratoire national de Los Alamos (LANL), dans le Nouveau-Mexique, aux États-Unis.

— **À lire** —

> B. Dasgupta et J. Kopp, Sterile neutrinos, *Physics Reports*, vol. 928, 15 pp. 1-63, 2021.

> S. V. Demidov *et al.*, Bounds of non-standard interactions of neutrinos from IceCube DeepCore data, *Journal of High Energy Physics*, vol. 2020(3), article 105, 2020.

> A. A. Aguilar-Arevalo *et al.*, Significant excess of electronlike events in the MiniBooNE short-baseline neutrino experiment, *Physical Review Letters*, vol. 121(22), article 221801, 2018.

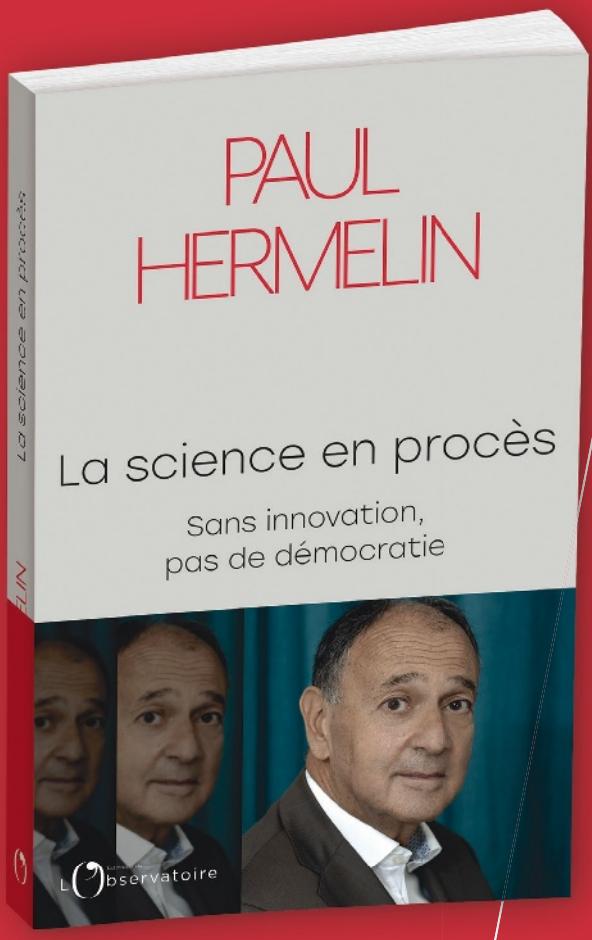
Un vibrant plaidoyer pour l'innovation et la science, piliers de nos démocraties.

« Un vademecum indispensable pour comprendre les enjeux d'un lendemain qui ne passe pas par la décroissance, mais par l'innovation responsable. »

Les Échos

« Une réflexion brûlante sur la place de la science et du progrès technique dans nos sociétés. »

Challenges

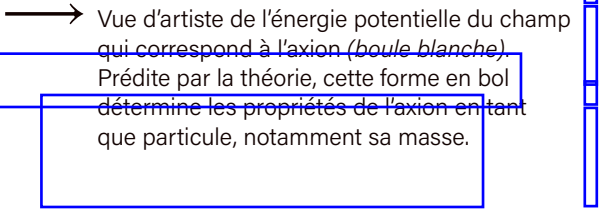


Éditions de L'Observatoire

Inventé pour régler un problème crucial de symétrie dans le modèle standard, l'axion est désormais l'une des particules les plus en vue pour occuper le poste de matière noire. Encore faut-il qu'elle existe…

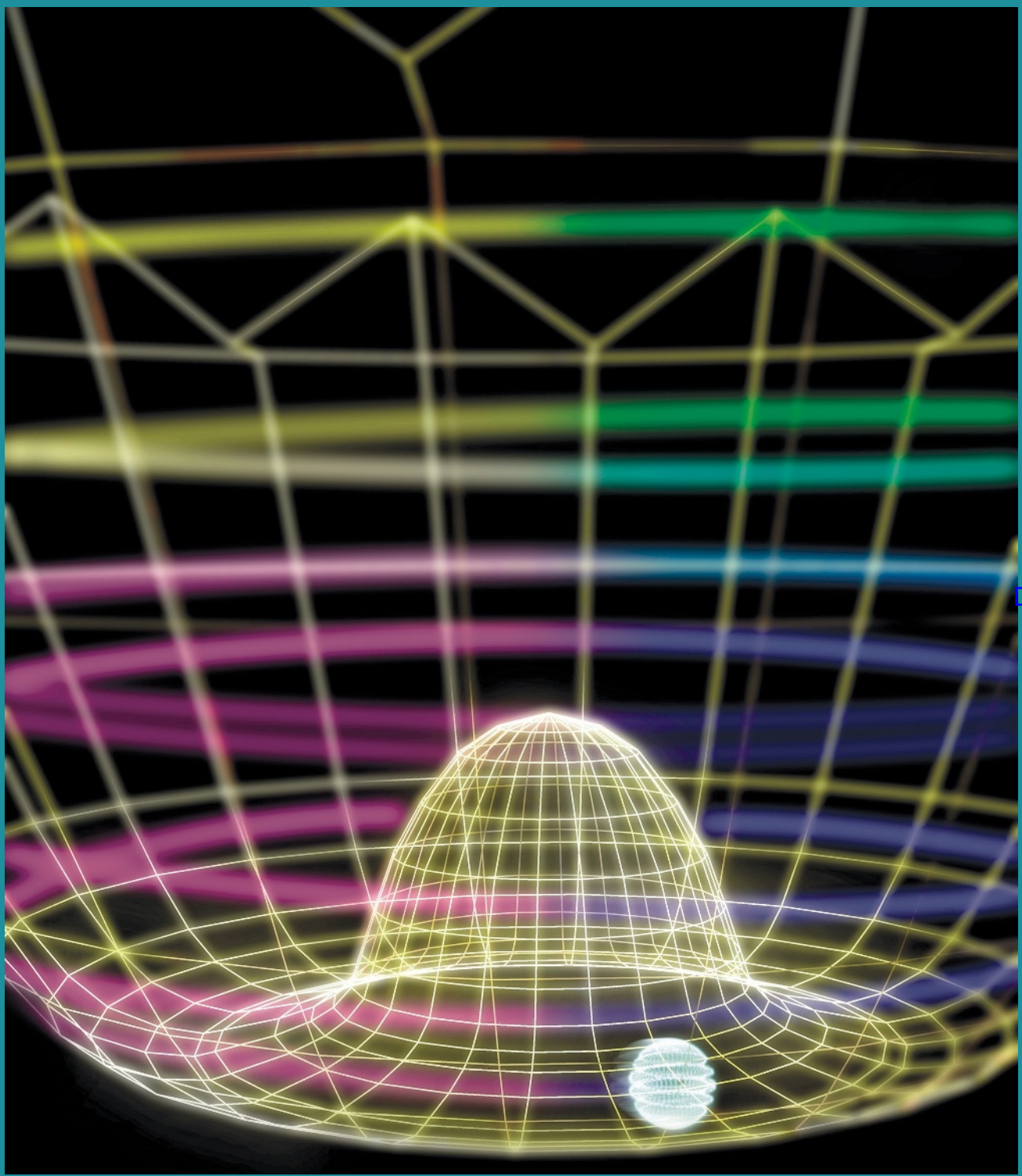
La physique passe à l'axion

Chanda Prescod-Weinstein



Vue d'artiste de l'énergie potentielle du champ qui correspond à l'axion *(boule blanche)*. Prédite par la théorie, cette forme en bol détermine les propriétés de l'axion en tant que particule, notamment sa masse.

© Ramon Andrade 3DCiencia/Science Source



En bref

> Particules hypothétiques, les axions expliqueraient une perturbante asymétrie au cœur du modèle standard.

> Ces particules sont également des candidats au titre de matière noire, ce composant mystérieux qui explique la forme des grandes structures de l'Univers.

> Plusieurs expériences traquent les axions, notamment grâce à des études astronomiques, même si elles n'offrent que des preuves indirectes de leur existence.

> Des mesures directes sont tentées sur Terre, mais elles n'ont pas encore conclu à l'existence des axions. De nouveaux instruments sont en cours de développement pour y remédier.

Il y a deux façons de commencer un article sur l'axion. La première est d'expliquer que cette particule hypothétique serait la clé d'un problème majeur du modèle standard de la physique, qui décrit toutes les particules connues. Mais toute la beauté de l'axion est qu'un autre début est possible, tout aussi intéressant. Les physiciens le soupçonnent désormais d'être également la réponse à une des questions les plus importantes de la science : qu'est-ce que la « matière noire » ?

Ce terme désigne la substance invisible qui semble dominer la formation des structures cosmiques comme les galaxies et constituerait l'écrasante majorité de la matière palpable de l'Univers *(voir la figure page 40)*. Présenter toutes les particules proposées pour l'expliquer serait un peu comme décrire tous les occupants d'une ménagerie gigantesque *(voir Beaucoup d'appelés, pas encore d'élu, par M. Cirelli, p. 102)*. Pendant un temps, de nombreux chercheurs ont placé leurs espoirs dans des candidates inspirées de la théorie de la supersymétrie. Ces prétendants ont été recherchés dans le Grand collisionneur de hadrons (LHC) du Cern, sous la frontière franco-suisse, ou dans des détecteurs souterrains tels que *LUX (Large Underground Xenon)*, aux États-Unis, et *Xenon1T*, en Italie. L'absence du moindre soupçon de découverte a renvoyé les physiciens à la case départ, à la recherche d'une nouvelle particule potentielle de matière noire à traquer. En conséquence, ces dernières années ont vu grandir la popularité d'un *outsider*, accessible par d'autres moyens, et qui avait jusqu'à présent peu fait parler de lui : l'axion.

Je l'avoue, je n'ai pas toujours cru que la matière noire était si importante que cela. En fait, je trouvais même que c'était un sujet ennuyeux et marginal de la physique, qui ne tarderait pas à être résolu. Pendant longtemps, le seul grand défi de notre époque me semblait être l'accélération de l'expansion de l'Univers, peut-être parce que les scientifiques l'ont découverte l'année où j'ai commencé mes études universitaires. Il est facile d'attribuer cette attitude à mon ignorance de jeunesse, mais le fait est que partout où je tendais l'oreille, des conversations passionnantes portaient sur l'« énergie sombre ».

En 2000, j'ai eu l'occasion de passer quelques mois à faire de la recherche en physique des particules. Dans ce cadre, j'ai visité le Fermilab, où j'ai assisté à une présentation donnée par un grand physicien théoricien, Edward « Rocky » Kolb. C'était deux ans après que les astronomes avaient publié que non seulement l'Univers était en expansion, mais que cette expansion accélérait. Les efforts pour concilier ces nouvelles données empiriques avec notre meilleur cadre théorique de la gravitation, la relativité générale, ont conduit à l'idée que l'espace est empli d'une énergie invisible : l'énergie sombre *(voir Les cachotteries de l'énergie sombre, par P. Brax, p. 112)*.

Edward Kolb a ouvert sa présentation en rappelant que les cosmologues avaient déterminé la composition de l'Univers. Soit, à cette époque, 5 % de matière « ordinaire », 20 % de matière noire, et 70 % d'énergie sombre (les réévaluations récentes donnent 26,8 % et 68,3 % pour ces deux dernières). Nous étions tout près du but, disait-il. Il restait « juste » à déterminer ce qu'étaient la matière noire et

↑ Tout comme les galaxies, les amas de galaxies (*ici, MACS J0416.1-240*) baignent dans un nuage de matière noire, indispensable pour conserver leur cohésion, mais impossible à observer directement. Sur cette image, sa présence correspond au halo bleuté.

l'énergie sombre… Après cette plaisanterie, je me suis imaginé que nous trouverions bientôt la matière noire, et que l'énergie sombre était le seul véritable mystère qui vaille la peine de s'y intéresser. Erreur…

La matière noire a le don de vous attirer irrésistiblement, et pour moi cette attraction est passée par les axions. Aujourd'hui, mes collègues du monde entier voient en moi une spécialiste de cette particule. Pour comprendre comment j'ai été captivée par une particule qui n'a peut-être aucune réalité, il importe de revenir à ses origines, en l'occurrence le problème CP (charge-parité) fort.

DES FAILLES DANS LE MODÈLE STANDARD

L'axion a fait ses débuts comme solution à un problème du modèle standard de la physique, et plus précisément de la partie qui repose sur la chromodynamique quantique (QCD), qui gouverne les particules fondamentales que sont les quarks et les gluons : comment interagissent-elles ? Se regroupent-elles ? Etc. La QCD est très efficace, mais elle prédit pour le neutron, constitué de quarks, des propriétés qui n'ont jamais été observées. Pour mieux saisir, quelques notions des mathématiques qui se cachent derrière l'édifice complexe du modèle standard sont utiles.

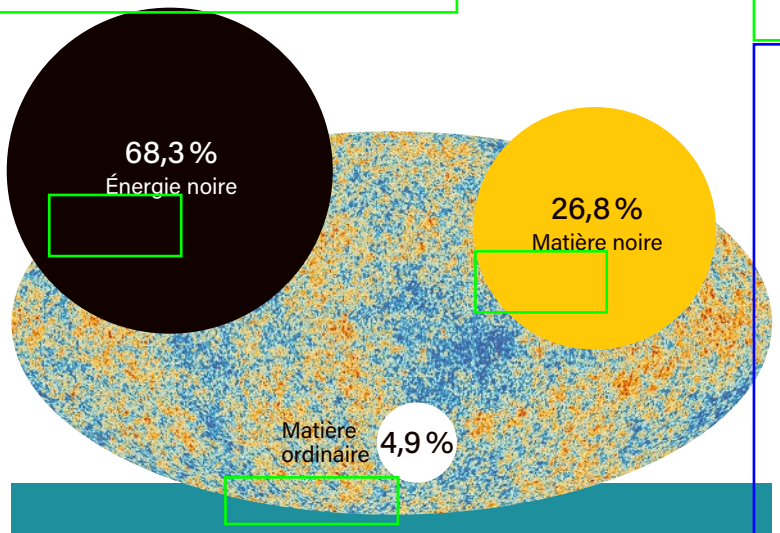
Il existe une recette spéciale pour transcrire de nouvelles idées en physique des particules. Nous utilisons pour cela un objet mathématique, le lagrangien, censé caractériser les propriétés d'une particule, et à partir duquel on peut prédire le comportement de cette particule dans l'espace et dans le temps. Les ingrédients de base sont les composantes qui décrivent les différents types d'énergie que peut prendre une particule. À cela s'ajoute une pincée d'« épices », qui correspondent, par exemple, à la manière dont la particule interagit avec d'autres particules. Comme en pâtisserie, des règles très précises dictent comment doser ces composantes et s'assurer que leur effet n'est ni trop faible ni trop fort. Beaucoup de ces règles reposent sur l'attente que chaque terme du lagrangien restera inchangé après une opération mathématique associée à une symétrie.

Cela peut sembler complexe, mais nous avons l'habitude des symétries dans notre vie

© 2021 Sigma Xi, The Scientific Research Honor Society. Reproduction with permission only. Contact perm...@amsci.org

quotidienne. Un cercle, par exemple, est symétrique : quelle que soit la rotation qu'on lui fait subir, chaque point du cercle est identique à tous les autres points. En d'autres termes, quand vous faites tourner un cercle autour de son centre, il ne change pas. Cette propriété est une symétrie de rotation. La symétrie peut être brisée si, entre autres, je dessine un point de couleur sur le cercle. Il y a maintenant un point particulier sur le cercle, et, en le faisant tourner, cela change l'emplacement de ce point particulier.

Un exemple de symétrie attendu dans le modèle standard serait une invariance par translation dans le temps : décaler l'intervalle de temps mis dans l'équation ne change pas la solution. La gravité de la Terre est la même de jour comme de nuit : elle est invariante par translation dans le temps. Si un terme que nous envisageons d'ajouter à l'équation ne respecte pas une symétrie que nous savons ou supposons importante, nous le rejetterons. Si notre hypothèse contient une équation indiquant que la gravitation change de temps à autre, c'est perdu d'avance. D'un point de vue physique, ces symétries impliquent l'existence de lois de conservation, garantissant, par exemple, que nous ne créons pas une charge électrique à partir de rien.



Les études sur l'axion entrent dans le champ plus global des recherches sur la matière noire, laquelle représente environ de 27 % des constituants l'Univers. C'est un sujet connexe mais distinct de l'énergie sombre, qui compte pour quelque 68 % de l'Univers.

PETIT COLMATAGE, GRANDES IMPLICATIONS

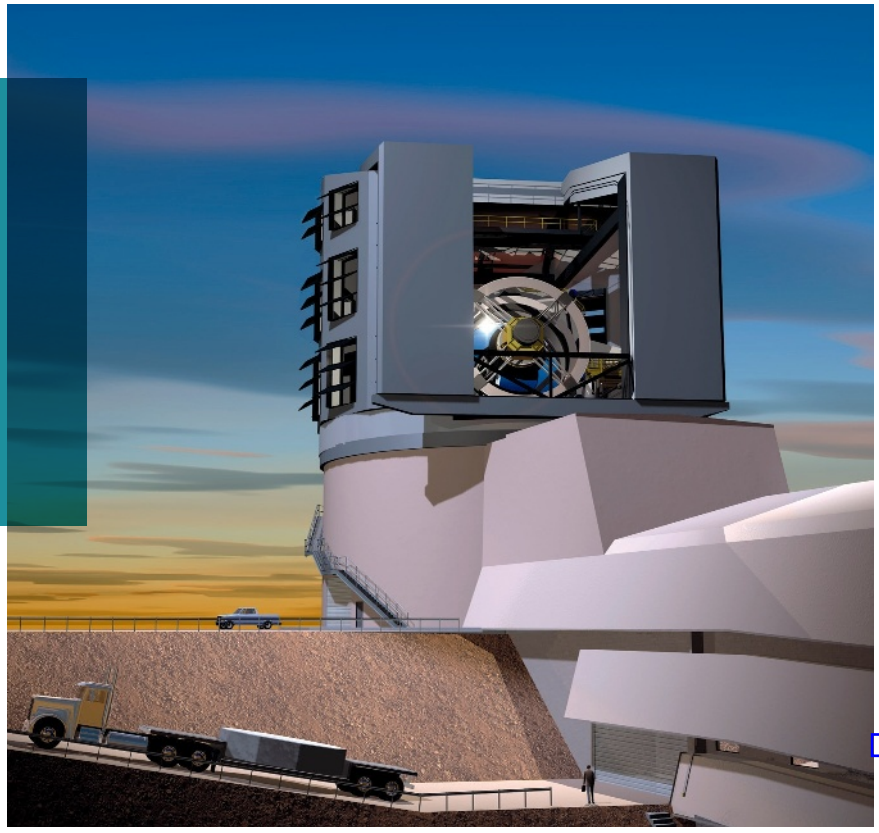
Comme nous l'avons déjà écrit, dans une perspective mathématique, le modèle standard est un long lagrangien avec de nombreux termes, décrivant toutes les particules observées. Les scientifiques l'ont formalisé progressivement, par essais et erreurs théoriques et expérimentaux. Quand les expériences suggéraient la nécessité de nouveaux termes, les théoriciens écrivaient des modèles avec des symétries hypothétiques et vérifiaient leur compatibilité avec les données. Parfois ces modèles s'accordaient avec les données, mais au prix d'autres particules non encore détectées et venant enrichir le modèle. L'axion a émergé de ce ping-pong entre théorie et expériences. Et ce n'était pas le premier…

Un exemple est la découverte du quark top, prédit dans les années 1970, mais observé en 1995 seulement. À partir des années 1960, des expériences avec une particule spéciale nommée « kaon » indiquaient que sa désintégration s'accompagnait de violations de la symétrie CP. Cette symétrie a deux composantes : avec la symétrie de conjugaison de charge, la physique du système reste la même si le signe de la charge de la particule passe de positif à négatif, ou *vice versa*. Un phénomène ou un objet présente une symétrie de parité si on a le même résultat physique en cas d'inversion de signe de ses coordonnées spatiales (correspondant à un retournement gauche-droite ou haut-bas). Prises ensemble, les symétries de conjugaison de charge et de parité forment la symétrie CP. Chose importante, cette symétrie CP signifie que matière et antimatière doivent se comporter pareillement.

La désintégration des kaons montrait des signes de violation de la symétrie CP, ce qui suggérait qu'il manquait des quarks dans la formulation originale de la QCD. Les quarks sont des particules fondamentales qui composent d'autres particules, notamment les protons et les neutrons. À l'époque des expériences de désintégration du kaon, seuls quatre

© Barbara Aulicino; ESA and the Planck Collaboration

En construction au Chili, l'observatoire *Vera-C.-Rubin* sera, pour une décennie, l'un des plus grands instruments dédiés à la recherche sur la matière noire et l'énergie sombre. En trois nuits, il sera capable de couvrir l'intégralité du ciel.



© Todd Mason, Mason Productions Inc. / LSST Corporation

types de quarks étaient connus. Sur la base de résultats expérimentaux, Makoto Kobayashi et Toshihide Maskawa, de l'université de Kyoto, ont proposé l'existence de deux quarks supplémentaires, les quarks top («dessus») et bottom («dessous»). Prédit en 1973, le quark top n'a été observé que vingt ans plus tard parce qu'il était trop lourd pour être vu avec les technologies des années 1970.

Quel rapport avec les axions ? J'y viens. Dans le lagrangien de la chromodynamique quantique (QCD), l'un des termes rend possible la violation de symétrie CP. Cela devient un souci quand nous considérons les implications expérimentales : le terme supplémentaire confère au neutron un moment dipolaire électrique, ce qui signifie que certaines parties d'un neutron auraient une charge locale positive ou négative mesurable. C'est un peu étrange, parce que le neutron est censé être… neutre, c'est-à-dire avoir une charge nulle.

Hélas, aucun indice expérimental ne plaide dans le sens d'un moment dipolaire électrique pour le neutron ; et depuis 2020, les contraintes expérimentales sur cette particule sont tellement bonnes que l'on n'imagine guère qu'il en aille autrement. En résumé, la théorie suggère qu'il devrait y avoir une violation de la symétrie CP, mais nulle trace expérimentale n'en existe dans le «secteur fort» du modèle standard, la partie où l'interaction forte domine. C'est donc le «problème CP fort». En partie à cause de lui, le modèle standard reste incomplet en dépit de tous ses succès. L'axion est apparu en réponse à cette difficulté.

Roberto Peccei et Helen Quinn ont développé la meilleure solution actuelle au problème CP fort à l'université Stanford dans les années 1970. Le mécanisme de Peccei-Quinn, comme on l'appelle aujourd'hui, remplace une variable constante dans le terme qui viole la symétrie CP par une variable dynamique qui «se relaxe» à

> Un terme de plus dans l'équation, et le neutron gagne une charge locale positive ou négative. Un peu étrange pour une particule supposée être neutre…

zéro, annulant le moment dipolaire électrique du neutron. On ne tarda pas à comprendre que ce mécanisme conduisait à la production d'une nouvelle particule hypothétique. Inspiré par une marque de lessive, le physicien théoricien Frank Wilczek l'a facétieusement nommée « axion », car elle « nettoie le problème ».

Au début des années 1980, les articles sur les conséquences observationnelles potentielles de l'hypothétique axion ont proliféré. Parmi elles, la possibilité que l'axion ait exactement les bonnes propriétés pour résoudre le problème de la matière noire, comme le suggérait par exemple le théoricien Pierre Sikivie, de l'université de Floride. Grâce aux données observationnelles, nous savons que les particules de matière noire doivent être de faible masse, non chargées électriquement, d'une grande stabilité, et peu rapides. Idéalement, un mécanisme évident devrait aussi exister pour produire une grande partie de ces particules de matière noire au tout début de l'Univers. L'axion possède à peu près toutes les caractéristiques recherchées pour la matière noire. Un parfait candidat, à un détail près : nous ne l'avons encore jamais vu, et nous ne savons même pas s'il existe vraiment.

LES AXIONS COMME MATIÈRE NOIRE

En fin de compte, je suis venue au problème de la matière noire par le questionnement sur l'évolution cosmologique des axions. Au début des années 2010, les physiciens débattaient des types d'état quantique dans lesquels les axions pourraient se trouver, et une partie des discussions tournait autour des calculs pour le déterminer. Je m'intéressais aux questions techniques concernant ces calculs, et c'est ainsi que j'ai commencé à travailler sur les axions. L'axion est un candidat à la matière noire à part, non seulement à cause de ses propriétés microphysiques spécifiques ou parce que nous en avons besoin indépendamment de sa relation avec le problème de la matière noire, mais aussi parce que ses propriétés peuvent se traduire en signatures astrophysiques distinctes de celles des autres candidats. Le débat fait encore rage sur l'étendue de ces différences entre les modèles de matière noire.

Avec un spin de valeur zéro, les axions font partie de la catégorie des bosons (très précisément, des bosons scalaires), alors que la plupart des autres candidats à la matière noire seraient plutôt des fermions. Une différence cruciale entre bosons et fermions est qu'en un même lieu, deux fermions ne peuvent pas partager le même état quantique. Cette règle explique pourquoi les électrons occupent des orbitales atomiques différentes. Les bosons, en revanche, n'ont aucune difficulté à partager un état. Un peu comme des majorettes, ils sont capables de se synchroniser complètement. Un résultat remarquable de cette propriété est le condensat de Bose-Einstein, dans lequel de nombreux bosons partagent le même état de basse énergie et se comportent comme un unique superboson. Nous savons que le condensat de Bose-Einstein existe, car nous en créons en laboratoire avec des atomes depuis près de vingt-cinq ans. Désormais, nous nous demandons si cela se produirait aussi dans

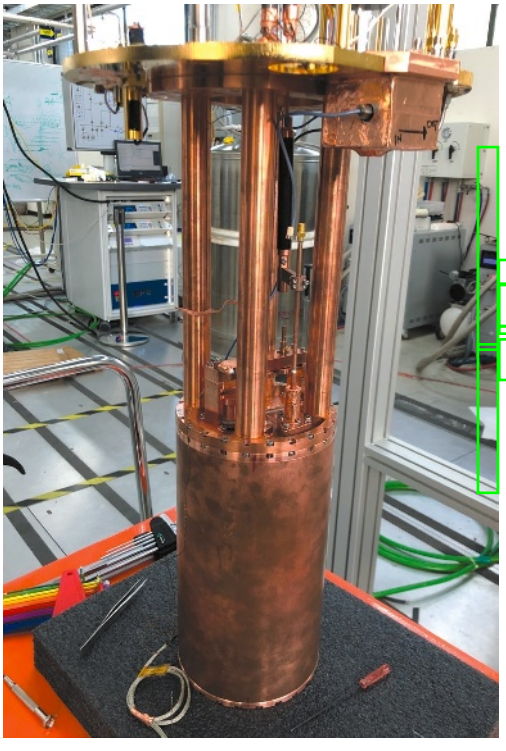
l'espace avec la matière noire. Si c'est le cas, la structure et l'évolution de l'Univers en seraient profondément bouleversées.

Le diable est dans les détails. Cette question est importante, mais d'autres surgissent dans la foulée. S'il existe des condensats de Bose-Einstein de matière noire, nous aimerions savoir quels types d'objets ils forment, leur masse et leur taille typique, et comment ils interagissent. En 2014, à l'institut de technologie du Massachusetts (MIT), avec Mark Hertzberg (maintenant à l'université Tufts) et notre mentor Alan Guth, j'ai entrepris de tester l'hypothèse selon laquelle les condensats de Bose-Einstein de ces axions seraient énormes, de la taille des galaxies. Nous avons trouvé le contraire… En partant des propriétés de l'axion prédit par Peccei et Quinn dans les années 1970, nous avons mis en évidence, par le calcul, des condensats d'axions de la taille d'astéroïdes, des « axstéroïdes », comme les a nommés Anna Watts, de l'université d'Amsterdam.

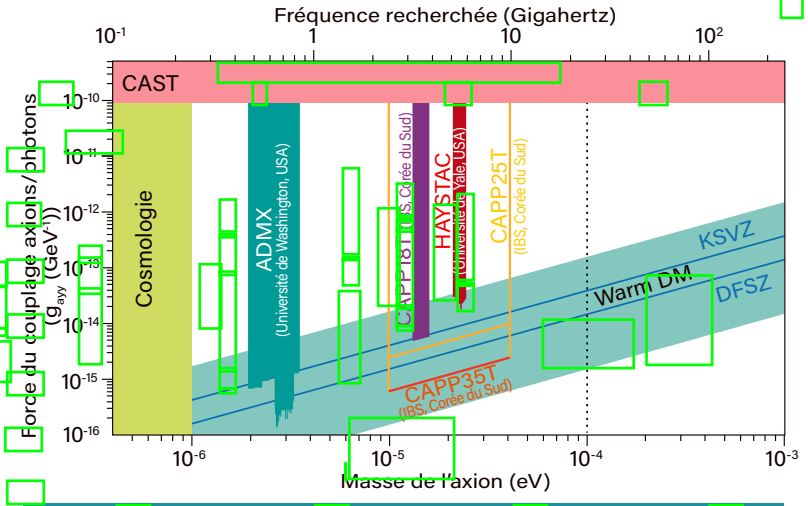
Ces calculs hypothétiques des phénomènes astrophysiques liés aux axions sont intéressants parce que nous pouvons les confronter aux observations et vérifier si l'axion tient la route comme candidat à la matière noire. Aujourd'hui, mes recherches se concentrent sur le développement d'outils de calcul robustes pour modéliser les axions dans l'espace. Je travaille en particulier avec Kay Kirkpatrick et Tony Mirasola, de l'université de l'Illinois, à Urbana-Champaign. Nous tentons de comprendre exactement quelles techniques mathématiques sont nécessaires pour rendre compte de toutes les propriétés de l'axion. Ces travaux ont une incidence sur ce qu'il est nécessaire d'intégrer dans les simulations numériques destinées à modéliser le halo de matière noire supposé entourer notre galaxie.

L'ESPOIR D'UNE INTERACTION

Les implications observationnelles des axions, elles, ne sont pas encore totalement comprises pour les différentes masses possibles de la particule. Les axions légers auraient pu former un condensat de la taille du halo



© Courtesy of Soohyung Lee/ Center for Axion and Precision Physics Research, Institute for Basic Science



Plusieurs expériences traquent ou ont traqué les axions dans des gammes différentes de masse et de fréquence associée. Les noms en lettres capitales indiquent les principales d'entre elles. A gauche, l'expérience CAPP-8TB en Corée du Sud.

> Ce mécanisme conduisait à l'hypothèse d'une nouvelle particule. Elle fut nommée « axion », d'après le nom d'une lessive, parce qu'elle « nettoie le problème »

galactique. Les plus lourds auraient pu donner des axstéroïdes dans le jeune Univers, mais nous ignorons quel en aurait été le destin.

Les études astronomiques ne nous renseignent qu'indirectement sur les propriétés et le comportement des axions. La détection directe, par une expérimentation *ad hoc*, offrirait très certainement plus d'informations sur les propriétés spécifiques des axions, et apporterait également un degré de certitude sans doute impossible à atteindre avec les seules données astronomiques. En effet, deux particules hypothétiques différentes produisant des structures similaires à grande échelle ne pourraient être différenciées sur la seule base des données astronomiques.

Heureusement, même si, en théorie, la matière noire ne rayonne pas et la lumière la traverse sans s'arrêter, nous avons bon espoir que, parfois, ce ne soit pas toujours le cas. Dans certaines conditions bien précises, elle pourrait interagir avec les photons ou d'autres particules connues, ce qui produirait des effets observables uniques révélant son identité et les propriétés de ses particules. En particulier, soumis à un champ magnétique extrêmement intense, un axion devrait se désintégrer en photons microondes détectables. L'expérience *ADMX (Axion dark matter experiment)*, à l'université de Washington, teste ce phénomène au moyen d'un champ magnétique de 8 teslas, environ 100 000 fois plus intense que le champ magnétique terrestre.

Présentée ainsi, cette expérience semble simple, mais elle est en pratique très délicate. Régler le champ magnétique et s'assurer que la cavité à microondes soit dépourvue de « bruit » (comme des photons accidentels résultant d'autre chose) est crucial pour empêcher de fausses détections. Le modèle de Peccei-Quinn est muet sur l'intensité de la relation entre le champ magnétique et l'axion, ainsi que sur la masse de l'axion. C'est pourquoi l'expérience *ADMX* explore toute une gamme de propriétés possibles de l'axion et ne peut se concentrer sur des valeurs précises.

APRÈS L'AXION, LA « PARTICULE DE TYPE AXION »

Pour compliquer encore les choses, le terme d'« axion » ne se réfère plus aujourd'hui au seul axion dit « QCD », dérivé du mécanisme de Peccei-Quinn. En effet, le modèle de gravité quantique connu sous le nom de « théorie des cordes » comporte de nombreuses particules avec des propriétés très proches de celles de l'axion de la QCD, et les physiciens les ont maintenant (en prenant quelques libertés) classées comme des axions, bien qu'elles n'aient pas les propriétés permettant de résoudre le problème CP fort. Les plus rigoureux d'entre nous préfèrent parler de « particules de type axion ». Mais pas tous. De nos jours, quand je m'exprime face à des physiciens, j'explique la nomenclature des axions, y compris des termes tels qu'« axion ultraléger », celui-ci se rapportant à des particules de très faible masse inspirées par la théorie des cordes.

Parce que les « particules de type axion » ne sont pas tenues de résoudre le problème CP fort, les contraintes sur leurs propriétés

potentielles sont moins nombreuses. Les axions ultralégers, par exemple, pourraient avoir une large gamme d'interactions avec le champ électromagnétique et une fourchette de masses plus étendue que l'axion de la QCD. Davantage de liberté élargit le terrain de jeu et le rend encore plus stimulant pour les théoriciens, mais constitue aussi un défi expérimental. Rechercher des « particules de type axion » sur tout l'espace des paramètres est un travail de longue haleine.

Quand j'ai commencé à travailler sur les axions en 2014, c'est de la part de mes collègues d'Europe et d'Asie que j'ai constaté le plus d'intérêt. La situation est très différente aujourd'hui. On dirait que tout le monde parle d'axions, et qu'ils sont omniprésents dans la recherche… et peut-être autour de nous. Nous les cherchons partout, sur Terre et dans l'espace.

CES NOUVEAUX INSTRUMENTS PLEINS DE PROMESSES

ADMX continue à chasser l'axion. Outre *ADMX*, les expériences *Abracadabra* (*A broadband/resonant approach to cosmic axion detection with an amplifying B-field ring apparatus)* au MIT et plusieurs autres au CAPP (Center for Axion and Precision Physics Research), en Corée du Sud, utilisent des instruments comparables à base d'aimants pour trouver des preuves directes de son existence. D'autres chercheurs, parmi lesquels mon groupe à l'université du New Hampshire, en collaboration avec des collègues de l'université Stanford, en Californie, et du Fermilab, dans l'Illinois, incorporent des axions et des particules de type axion dans les simulations numériques qui modélisent la formation des galaxies. Nous comparons ensuite ces simulations aux observations des galaxies réelles pour voir si la matière noire constituée d'axions conduit aux bonnes structures.

Nos efforts d'investigation vont énormément se développer dans la prochaine décennie, quand de nouvelles installations, au premier rang desquelles l'observatoire Vera-C.-Rubin (en l'honneur de celle qui découvrit les premières preuves concluantes de la matière noire), commenceront à collecter des données. Ces installations cartographieront la structure de l'Univers et la distribution inférée de la matière noire cosmique avec une précision sans précédent. Sur le modèle d'*ADMX*, nous pouvons également sonder le ciel à la recherche de systèmes célestes à fort champ magnétique : des étoiles à neutrons, ces objets compacts et denses qui se forment en fin de vie des étoiles massives. À cause de leur structure effondrée, elles ont souvent des champs magnétiques extrêmement puissants. En théorie, les axions interagiraient avec ces champs et produiraient des émissions inattendues d'ondes radio. Un groupe de recherche a récemment rapporté les possibles traces de telles émissions, mais je reste sceptique quant à leur validité.

Ces initiatives sont faciles à ranger dans la catégorie « recherche de matière noire », mais il y a bien plus que cela en jeu. L'axion QCD est un produit dérivé du mécanisme de Peccei-Quinn, et le problème CP fort reste non résolu. Autrement dit, la quête des axions est également celle d'un modèle standard de la physique des particules plus complet, et, *in fine*, d'une compréhension élargie de la complexité mathématique qui décrit notre Univers.

— L'autrice —

> Chanda Prescod-Weinstein est professeure assistante de physique à l'université du New Hampshire, aux États-Unis.

— À lire —

> N. Glennon *et al.*, Using PyUltraLight to model scalar dark matter with self-interactions, *Physical Review D*, à paraître, https://arxiv.org/abs/2011.09510, 2021.

> L. Hui, Wave dark matter, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, à paraître, https://arxiv.org/abs/2101.11735, 2021.

> T. Braine *et al.*, Extended search for the invisible axion with the axion dark matter experiment, *Physical Review Letters*, 124, 2020.

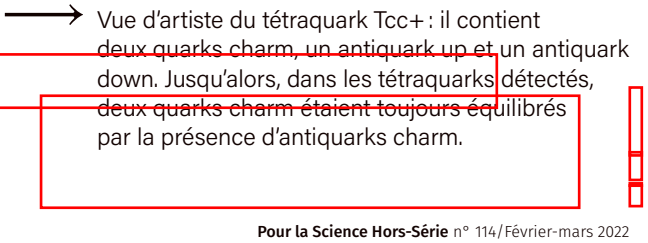
> K. Kirkpatrick *et al.*, Relaxation times for Bose-Einstein condensation in axion miniclusters, *Physical Review D*, 102, 103012, 2020.

> A. H. Guth *et al.*, Do dark matter axions form a condensate with long-range correlation?, *Physical Review D*, vol. 92, 2015.

Toutes les particules découvertes ne sont pas élémentaires. En témoigne un rarissime assemblage de quatre quarks, le tétraquark, débusqué par le détecteur « LHCb ». Ce drôle de zèbre permettra de tester des théories sur l'interaction nucléaire forte.

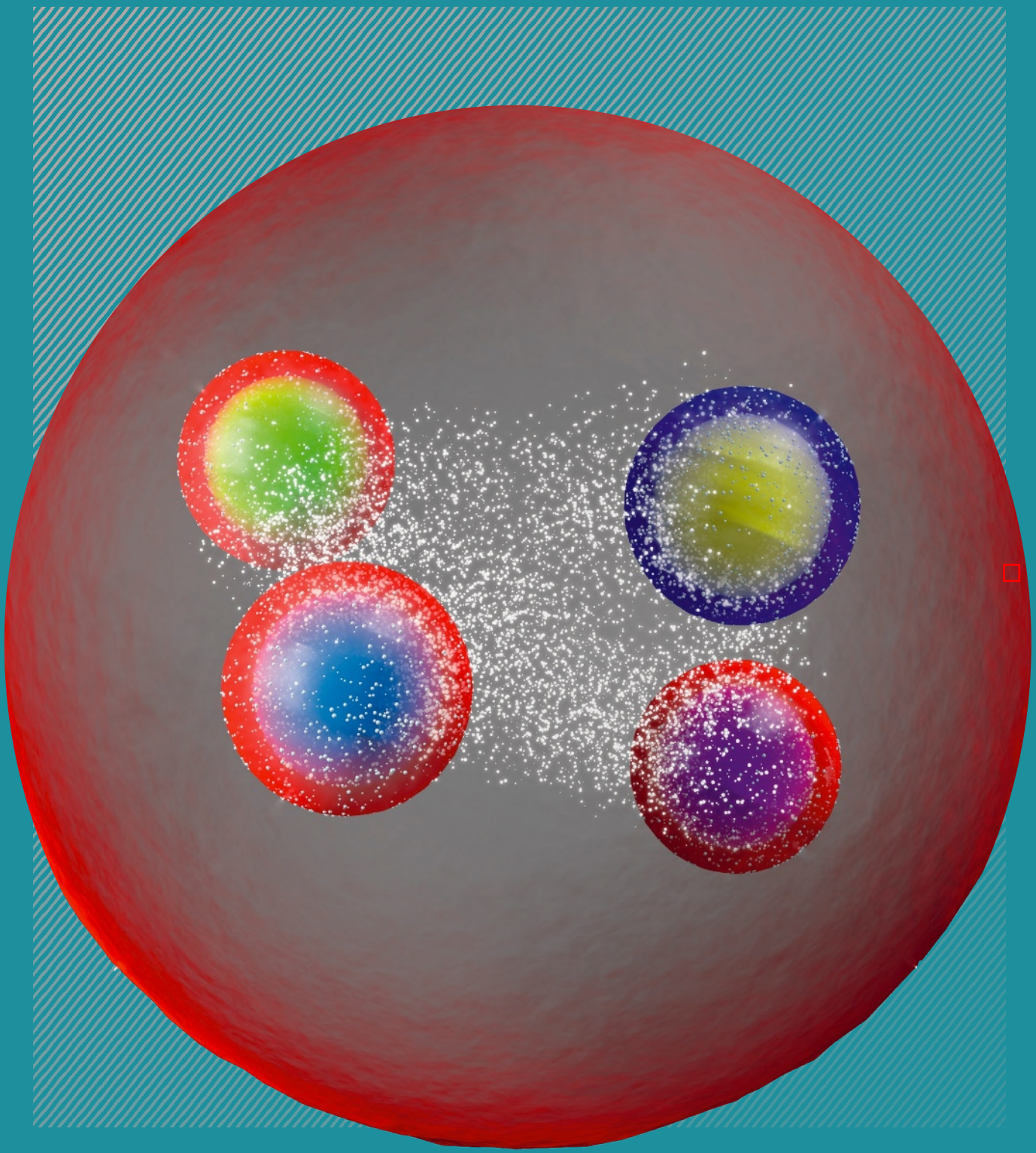
2 + 2 font quark, et même tétraquark

Davide Castelvecchi



Vue d'artiste du tétraquark Tcc+ : il contient deux quarks charm, un antiquark up et un antiquark down. Jusqu'alors, dans les tétraquarks détectés, deux quarks charm étaient toujours équilibrés par la présence d'antiquarks charm.

© D. Dominguez/CERN



Au Cern, le Grand collisionneur de hadrons, ou LHC, est aussi un grand… découvreur de hadrons ! Cet accélérateur de particules, enfoui sous la frontière franco-suisse, s'est rendu célèbre en 2012 en démontrant l'existence du boson de Higgs, la clé de voûte de la classification actuelle des particules élémentaires. Mais le LHC a aussi rapporté dans ses filets des dizaines de hadrons, c'est-à-dire des particules non élémentaires qui, comme les protons et les neutrons, sont composées de quarks.

Il y a peu, l'un des plus intrigants d'entre eux a fait son entrée dans le monde savant lors du congrès virtuel de la Société européenne de physique, le 29 juillet 2021. Le physicien Ivan Polyakov, de l'université de Syracuse, aux États-Unis, a dévoilé l'existence d'un hadron aussi inconnu qu'exotique, composé de quatre quarks. Au total, 62 hadrons nouveaux ont été épinglés par le LHC, d'après les comptes tenus par Patrick Koppenburg, de l'Institut national de physique subatomique d'Amsterdam, aux Pays-Bas. « Ce sont toutes des premières mondiales ! », insiste ce physicien basé au Cern, le laboratoire européen de physique des particules qui abrite le LHC.

Le « panthéon » des particules, le modèle standard, décrit les briques fondamentales de la matière et les forces qui agissent sur elles. Il comprend six sortes de quarks, ainsi que leurs six contreparties en antimatière et quelques autres particules élémentaires, parmi lesquelles les électrons et les photons. Le modèle standard inclut aussi les règles d'après lesquelles les quarks forment des particules composites, les fameux hadrons. Les quarks sont maintenus ensemble par l'interaction nucléaire forte – ou force forte –, l'une des quatre forces fondamentales. Les deux quarks les plus communs dans la nature sont le u (pour *up*, « haut ») et le d (*down*, « bas ») ; leurs combinaisons possibles comprennent les neutrons (un u et deux d) et les protons (deux u et un d).

Dans l'état actuel des connaissances, les protons sont les seuls hadrons stables, même pris isolément – les neutrons ne le sont qu'une fois incorporés aux noyaux atomiques. Tous les autres hadrons ne se forment que fugacement, lors de la collision d'autres particules, et ils se désintègrent en une fraction de seconde. En somme, le LHC crée de nouvelles sortes de hadrons en fracassant frontalement, et à haute énergie, des faisceaux de protons.

QUARTET DE QUARKS

La plupart des hadrons nouveaux du LHC ont été détectés par *LHCb*, l'un des quatre détecteurs géants situés dans le tunnel circulaire de 27 kilomètres qui abrite le LHC, et la particule révélée par Ivan Polyakov n'a pas fait exception. En passant au crible les données relatives aux débris issus des collisions de protons, le physicien et son collaborateur Vanya Belyaev, de l'Institut de physique théorique et expérimentale à Moscou, ont trouvé la signature attendue d'un hadron à quatre quarks, un tétraquark donc, nommé Tcc+ (pour tétraquark à deux *charm* chargé positivement).

Cette configuration est extrêmement rare : la plupart des hadrons connus sont faits de deux ou trois quarks. Le premier tétraquark

En bref

> Quarks et antiquarks comptent parmi les briques fondamentales de la matière.

> On les rencontre le plus souvent réunis à 2 ou 3 dans des hadrons, comme le proton.

> Récemment découvert, le tétraquark Tcc+ se démarque en étant composé de deux quarks et deux antiquarks.

> Cet authentique quadruplet, et d'autres encore sans doute, étaient plus abondants aux origines de l'Univers.

fut repéré à l'Organisation de recherche avec des accélérateurs de haute énergie (KEK), à Tsukuba, au Japon, en 2003 ; et *LHCb* en a aperçu lui aussi quelques autres. Néanmoins, celui qui vient d'être découvert est une franche curiosité. Les tétraquarks précédents étaient probablement des paires de doublets de quarks ordinaires, liés ensemble comme des atomes dans une molécule, mais selon le physicien Marek Karliner, celui-ci est possiblement un authentique quadruplet, solidement lié. « C'est une découverte importante. Il s'agit d'un nouvel animal, et non d'une simple nouvelle molécule hadronique. C'est vraiment le tout premier de son espèce, » insiste ce chercheur de l'université de Tel Aviv, en Israël, et qui a contribué en 2017 à la prédiction de l'existence d'une particule ayant les mêmes propriétés que Tcc+.

Dans la nature, les tétraquarks n'ont sans doute existé qu'aux premiers instants de l'Univers, quand toute la matière était comprimée dans un volume extrêmement petit, explique Vanya Belyaev. En les créant de nouveau, les physiciens sont en mesure de tester leurs théories sur les interactions des particules à travers la force forte.

Les données ont révélé les propriétés de la nouvelle particule avec une telle précision que Vanya Belyaev s'en est trouvé abasourdi. « Je me suis d'abord dit : j'ai fait une erreur », reconnaît-il. Par exemple, la masse de la particule, environ quatre fois celle d'un proton, a été obtenue avec une marge d'erreur 3 000 fois meilleure que celle du boson de Higgs. D'après Vanya Belyaev, Tcc+ aurait déjà pu être débusqué dans des données remontant aux débuts du LHC, et si lui et ses collègues ne le découvrent qu'à présent, c'est parce que leur liste de particules à chercher était déjà longue.

DES POSSIBILITÉS SANS LIMITES

La recherche de nouveaux hadrons ne va pas s'arrêter là. Les quarks peuvent donner des hadrons selon des dizaines de combinaisons possibles. D'après Marek Karliner, il existe 50 hadrons à deux quarks, parmi lesquels un seul n'a pas encore été observé, et 75 triplets possibles (et autant de triplets d'antiquarks), parmi lesquels presque 50 ont été vus. « Les autres existent, nous en sommes certains, mais il est difficile de les créer », avoue Marek Karliner.

Dans la nature, les tétraquarks n'ont sans doute existé qu'aux premiers instants de l'Univers

De plus, pour chaque combinaison de quarks, il y a un nombre presque illimité « d'états excités » plus lourds – reconnaissables, par exemple, à leur vitesse de rotation – et chacun est catalogué comme une particule à part entière. Nombre d'entre eux ont été découverts expérimentalement, et, de fait, la majorité des particules dans le catalogue de Patrick Koppenburg sont des états excités. « Qui sait combien d'autres états se cachent sous notre nez, patientant sagement dans les données contenues quelque part dans un ordinateur ? » s'interroge le chercheur qui, comme Ivan Polyakov et Vanya Belyaev, est membre de la collaboration *LHCb*. Il se demande aussi si toutes ces découvertes devraient être traitées comme des particules à part entière. « Plus ça va, ajoute-t-il, et plus je suis convaincu que nous avons besoin de mieux définir ce qu'est une particule. » Vaste sujet…

— L'auteur —

> **Davide Castelvecchi** est journaliste scientifique à *Nature* et chroniqueur à *Scientific American*.

Cet article est une traduction de *Exotic Four-Quark Particle Spotted at Large Hadron Collider* paru dans *Nature* le 10 août 2021.

— À lire —

> LHCb collaboration, Observation of an exotic narrow doubly charmed tetraquark, https://arxiv.org/abs/2109.01038, 2021.

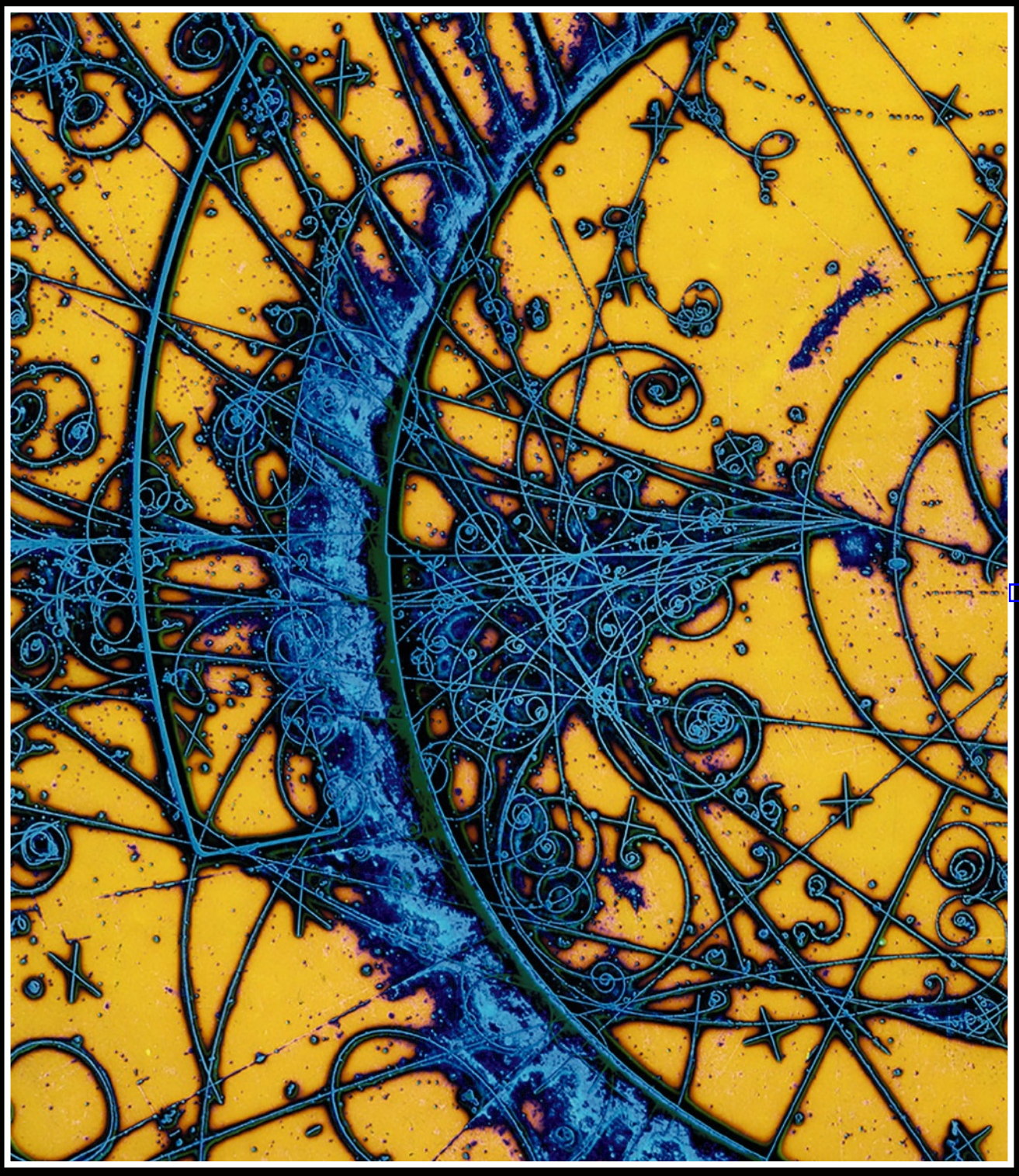
> Le site de Patrick Koppenburg : https://www.nikhef.nl/~p-koppenb/particles.html

Si son étude n'avait dépendu que de nos yeux, le modèle standard serait bien vide. Heureusement, les outils de détection, en progrès croissants depuis un siècle, ont ouvert une fenêtre sur l'invisible.

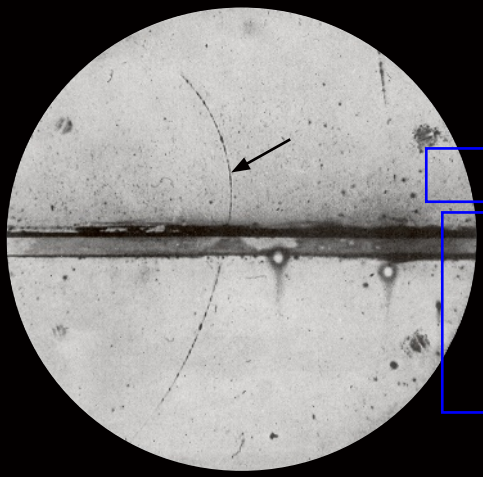
Chambres avec vue sur particules

Une pluie de données ⟶

Les données, voilà les amies des physiciens. Cette photographie, artistiquement colorisée, saisit l'interaction entre particules dans la **grande chambre à bulles européenne**, mise en service en 1973. En onze années d'exploitation au Cern, cet instrument a enregistré 6,3 millions d'événements. Aujourd'hui, dans ce même Cern, une expérience au Grand collisionneur de hadrons (LHC) en capte autant en… moins de deux heures !

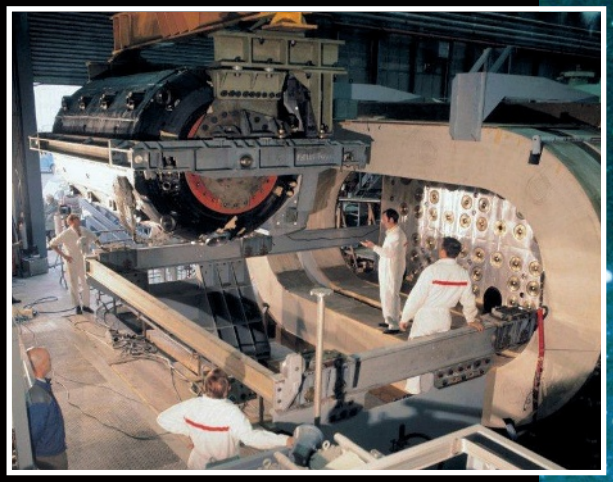


© CERN/Science Source



← Particule dans la brume

Photo historique ! Ce cliché, que l'on doit au physicien Carl D. Anderson, montre la trace (*flèche*) laissée par le premier positron, l'antiparticule de l'électron, jamais observé. C'était en 1932, à l'institut de technologie de Californie (Caltech), dans une **chambre à brouillard**. L'enceinte contient de la vapeur d'eau sursaturée. Quand des particules chargées la traversent, elles ionisent la vapeur, qui se condense autour des ions pour former des traînées de gouttelettes visibles le long de leur trajectoire.



Gargamelle et les neutrinos

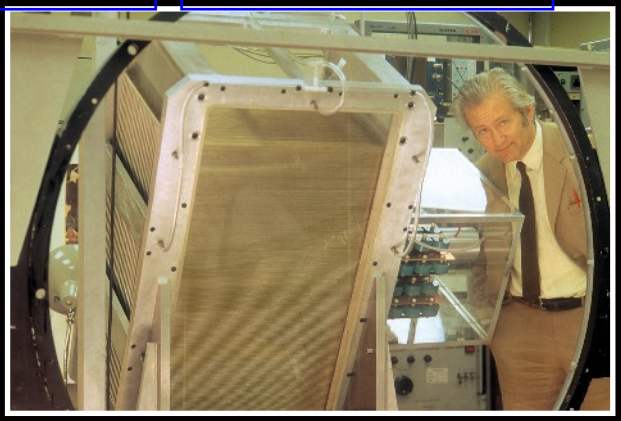
Les années 1950 voient l'essor des **chambres à bulles**, dans lesquelles un liquide surchauffé, souvent du dihydrogène, est sur le point de bouillir. Sur le passage d'une particule chargée, la température d'ébullition est atteinte et des bulles se forment. De la sorte, la chambre à bulles Gargamelle, du Cern (*ci-dessus*), met en évidence un courant neutre, interaction prédite par la théorie mais jamais observée, entre un neutrino et d'autres particules (*ci-contre*). Limites du procédé : la cadence des photographies est ralentie par les réglages de température et de pression. Et une légion de techniciens est nécessaire pour éplucher les clichés à la recherche des très rares événements intéressants pour la recherche.

© Photothèque IN2P3/CNRS

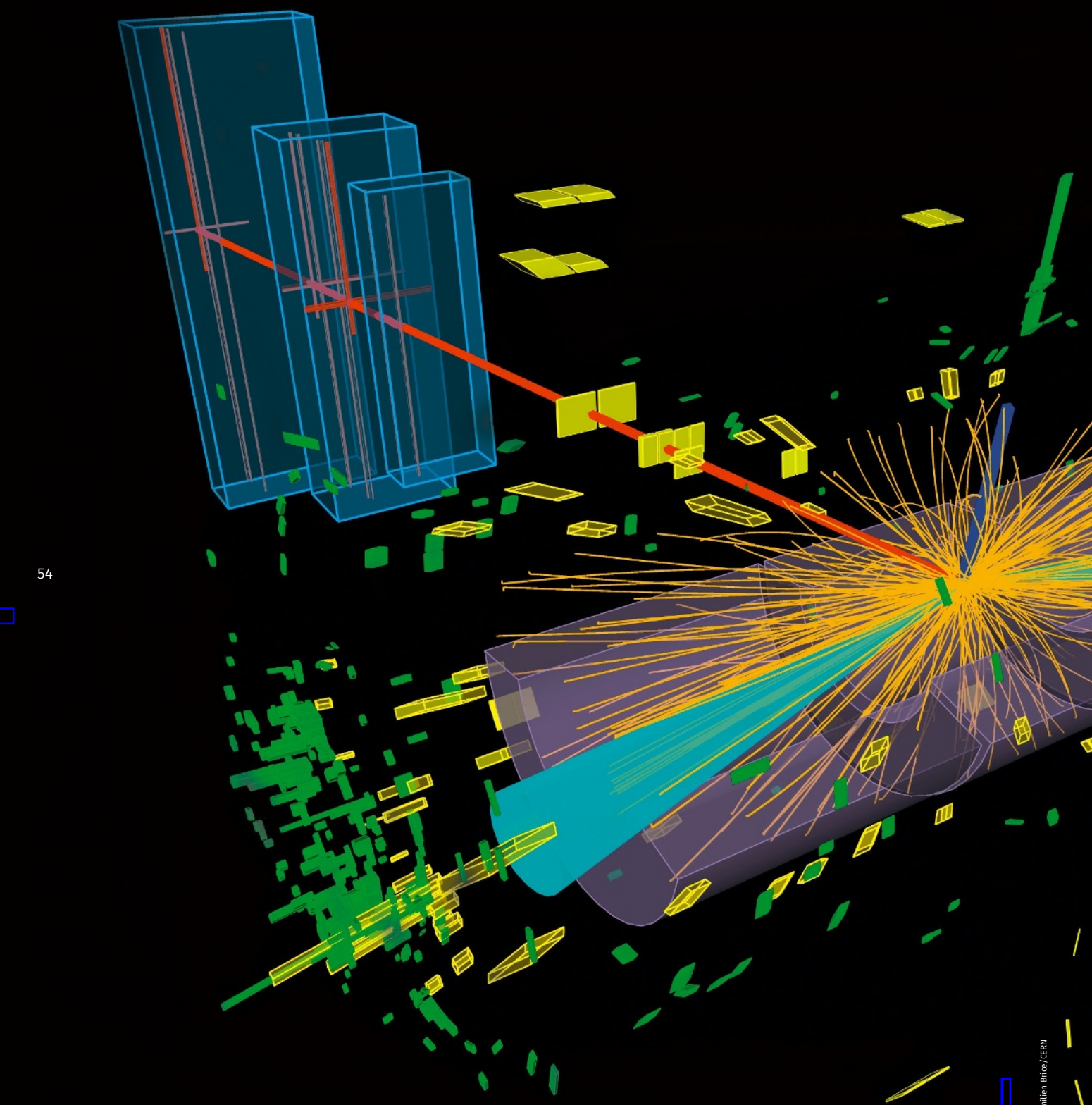
Mieux que le fil d'Ariane, le multifils de Georges

Pour aller plus loin, la physique des particules exige vitesse et précision. La chambre à étincelles est une étape. Mais la technologie de rupture arrive avec le physicien français Georges Charpak (*ci-dessous, à droite*), prix Nobel de physique en 1992.

En 1968, il développe la **chambre proportionnelle multifils** (*ci-dessous, à gauche*), enceinte remplie de gaz et tendue de nombreux fils de détection parallèles, mis sous tension électrique et connectés à des amplificateurs à transistors. La rapidité de comptage est multipliée par 1000, les opérations sont automatisables, gérables par ordinateur, bientôt visibles sur écran. En 1983, au Cern, l'expérience UA1, complétée par UA2, détecte les bosons W et Z, vecteurs de l'interaction faible (*ci-dessus*)



© CERN et Photothèque IN2P3/CNRS



© Maximilien Brice/CERN

Une carte Michelin à l'échelle subatomique

Désormais, des centaines de millions de collisions proton-proton se produisent en 1 seconde dans le LHC : impossible de tout enregistrer, les détecteurs géants comme *CMS* (*ci-dessus*) n'en conservent que 1000 par seconde. Chaque événement est une superposition de dizaines de collisions simultanées, qu'il faut séparer et trier par informatique, à la recherche du bon « événement candidat ». Visualiser ce maelström est aussi devenu un processus très complexe, nécessitant des logiciels qui convertissent les données en objets graphiques, eux-mêmes retravaillés grâce à une application dédiée. Les caractéristiques choisies (angles, couleurs, événement qui doit apparaître) varient selon l'utilisation prévue : à gauche, capté par *Atlas*, voici l'événement candidat de la désintégration d'un boson de Higgs en deux taus, eux-mêmes désintégrés en électron (*ligne bleue*) et en muon (*ligne rouge*). Comme une carte vis-à-vis d'un paysage, ces représentations simplifient les traits du monde quantique pour le rendre lisible et permettre de s'y repérer.

© CERN

Des événements étranges

En physique des particules, les expérimentations les mieux pensées ne tournent pas toujours comme prévu. Prenez les muons, « cousins » des électrons. En cherchant à affiner la connaissance d'une de leurs caractéristiques, les théoriciens se trouvent tantôt en accord avec les mesures, tantôt en désaccord. Gênant ! Et que dire du quark b, dont certaines désintégrations s'obstinent à défier la théorie ? On comprend dès lors que les physiciens se prennent à rêver d'un nouveau type d'accélérateur afin que tout rentre dans l'ordre du modèle… ou pas.

© Sébastien Thibault/Pour la science

02

Une expérience au Fermilab sème le doute : la mesure du moment magnétique du muon ne colle pas avec les calculs théoriques. Sauf que… pas d'accord, objecte une autre équipe. Grain de sable ou pavé dans la mare ?

Le muon sur la sellette

Sean Bailly

© Fermilab/Cindy Arnold

Gros plan sur un quadrupôle magnétique, élément clé de l'expérience ***Muon g – 2***.

Pour aller au-delà d'une théorie aussi bien établie que l'est le modèle standard, plusieurs pistes sont envisagées. La découverte de particules non prévues serait un signe clair et net qu'une autre physique se cache au-delà. Une autre voie, plus indirecte, consiste à réaliser des mesures le plus précises possible dans des accélérateurs de particules et de comparer ces données expérimentales aux valeurs théoriques calculées dans le cadre du modèle standard. Une différence serait le signe qu'il manque un «ingrédient» dans ce dernier.

Parmi toutes les pistes qui relèvent de cette approche, celle impliquant une propriété du muon retient l'intérêt. Cette particule instable est une version plus massive de l'électron. Le bombardement de l'atmosphère terrestre par les rayons cosmiques en produit en abondance. Les muons sont alors souvent une source de perturbation dans les expériences de physique des particules, car ils pénètrent profondément dans la matière et interagissent avec les détecteurs. Cette capacité à traverser de grands volumes rocheux est néanmoins mise à profit dans des projets qui consistent à sonder la structure des pyramides d'Amérique centrale et d'Égypte ou à suivre l'activité des volcans.

Dans les accélérateurs de particules, les physiciens peuvent aussi produire en grande quantité des muons pour en étudier les propriétés. L'une d'elles, le «moment magnétique anomal», suscite beaucoup d'espoir pour mettre à l'épreuve le modèle standard. L'expérience *Muon g − 2*, au Fermilab, près de Chicago, aux États-Unis, vient de livrer ses premières données sur cette mesure.

Or ces résultats semblent en désaccord avec le modèle standard. Le moment magnétique anomal du muon, noté $g-2$ (on verra plus loin pourquoi), a été mesuré avec une grande précision : $(g-2)/2$ vaut $116\,592\,061(41) \times 10^{-11}$; la valeur entre parenthèses correspond à l'incertitude sur les deux derniers chiffres. L'écart avec la valeur théorique de référence est seulement de 251×10^{-11}, mais c'est suffisant pour parler d'une tension entre la mesure et le calcul théorique, cette différence étant grande par rapport aux incertitudes de la prédiction et de la mesure.

Cependant, tout n'est pas si simple dans le monde de la physique des particules : une équipe européenne vient de publier un résultat théorique compatible avec la mesure de Fermilab. Le muon n'a donc pas fini de défier les physiciens.

La nouvelle mesure réalisée par l'équipe de *Muon g − 2* était attendue depuis près de vingt ans. Entre 1997 et 2001, l'expérience *E821*, au laboratoire de Brookhaven, dans la banlieue de New York, avait réalisé une mesure reposant sur le même principe. Des muons étaient injectés dans un champ magnétique qui faisait osciller leur moment magnétique. En analysant ce mouvement périodique, les chercheurs ont estimé le moment magnétique anomal de la particule. Ils ont annoncé leurs premiers résultats en 2001, puis les définitifs en 2004, livrant une valeur légèrement supérieure à celle prédite par la théorie. Cette nouvelle a suscité beaucoup d'enthousiasme. Mais les données étaient insuffisantes sur le plan statistique pour garantir la validité du résultat. Une nouvelle expérience était nécessaire.

Or, à cette époque, l'attention était surtout tournée vers les grands collisionneurs Tevatron, au Fermilab, et LHC, au Cern. Les physiciens

En bref

> Les physiciens tentent de mettre en défaut le modèle standard avec des mesures très précises du moment magnétique du muon.

> Le résultat de l'expérience *Muon g − 2* conduite au Fermilab, près de Chicago, semble s'écarter de la valeur prédite par le modèle standard.

> Mais un nouveau calcul théorique établi par une équipe européenne suggère que ce dernier tiendrait encore.

> L'écart entre la prédiction et la mesure signifierait que des particules virtuelles ou une force non prévues n'ont pas été intégrées dans le calcul théorique

espéraient y découvrir le boson de Higgs et de nouvelles particules, avec notamment la perspective de mettre en évidence la «supersymétrie». Cette extension potentielle du modèle standard prévoit l'existence, pour chaque particule connue, d'un partenaire se distinguant seulement par sa masse et son spin (une grandeur quantique qui correspond au moment cinétique intrinsèque de la particule). Par exemple, un électron, dont le spin vaut 1/2 dans les unités usuelles, serait associé à un «sélectron» de spin nul.

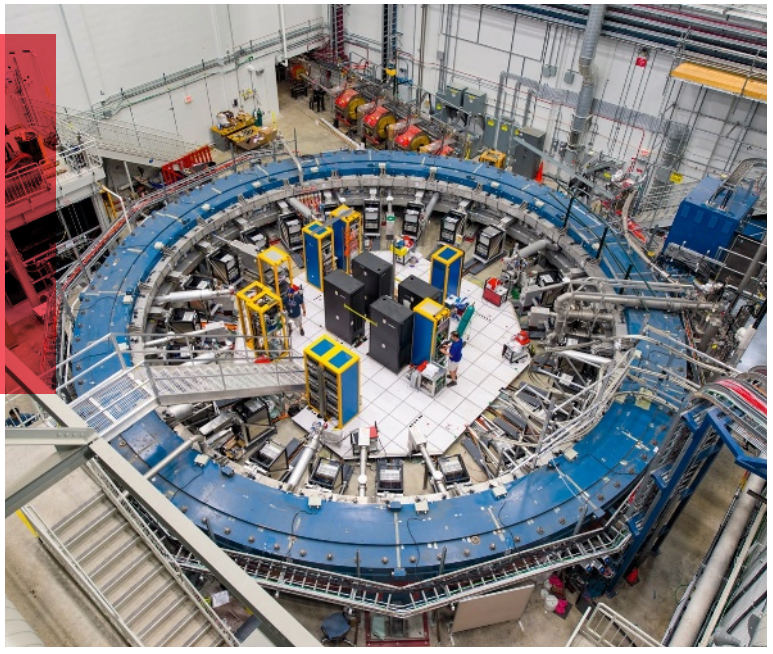
LES LIMITES DU MODÈLE STANDARD

Si la découverte du boson de Higgs au LHC a couronné d'une certaine façon les efforts pour valider le modèle standard, elle a aussi confirmé certains défauts de celui-ci. En effet, pour la majorité des physiciens, une masse de 125 gigaélectronvolts (environ 125 fois la masse d'un proton, en unités d'énergie) pour le boson de Higgs est difficile à expliquer.

Pour comprendre ce problème, il faut s'intéresser aux conséquences du principe d'incertitude de Heisenberg. Ce dernier autorise l'existence de fluctuations d'énergie pendant des temps très courts qui peuvent donner naissance à des particules. Ainsi, le vide n'est jamais vraiment «vide»: l'espace est le théâtre de la formation constante et sporadique de particules (par exemple un photon, ou un quark et son antiquark), qui subsistent un très bref instant et disparaissent en s'annihilant. Une particule n'est alors jamais isolée, mais toujours accompagnée d'un nuage de particules virtuelles qui influent sur ses caractéristiques. Dans le cas du boson de Higgs, ces particules virtuelles contribuent à la valeur de sa masse de façon très significative. Or le modèle standard ne nous explique pas le mécanisme qui empêche des particules virtuelles, qui pourraient intervenir à l'échelle de Planck (environ 10^{19} gigaélectronvolts) par exemple, de rendre cette masse gigantesque, supérieure de quelque 17 ordres de grandeur à la masse mesurée!

Le modèle standard n'explique pas non plus la très faible masse des neutrinos, la nature de la «matière noire» et de l'«énergie sombre», l'origine de l'excès de matière par rapport à l'antimatière observé dans l'Univers, l'organisation en trois familles des particules, etc. Il semble donc raisonnable de le considérer comme l'approximation à basse énergie d'une théorie plus fondamentale qui offrirait un cadre plus explicatif. Les physiciens ont exploré de nombreuses pistes et misaient en grande partie sur la supersymétrie. En effet, cette théorie permet de comprendre pourquoi la masse du boson de Higgs n'est pas gigantesque, prévoit des particules dont la matière noire pourrait être constituée, etc.

On pensait que l'énergie des collisions entre protons dans le LHC serait suffisante pour produire des particules supersymétriques. Mais les expériences n'en ont décelé aucune trace. Beaucoup de physiciens commencent donc à abandonner la piste de la supersymétrie et l'espoir de découvrir de nouvelles particules dans les détecteurs du LHC. Dès lors, pour sonder la physique au-delà du modèle standard, la stratégie des mesures de précision semble redevenir la plus prometteuse, notamment avec la mesure du moment magnétique anomal du muon, qui avait fourni des indices encourageants en 2004.



Injectés par le tube rouge *(en haut à gauche)*, les antimuons alimentent l'anneau circulaire *(en bleu)*. Les désintégrations d'antimuons émettent des positrons, qui sont détectés par les 24 calorimètres *(en noir, collés à l'anneau)*.

En quoi consiste exactement cette mesure ? Les leptons (la famille qui inclut l'électron, le muon et le tau, une particule encore plus lourde et plus instable que le muon, ainsi que trois neutrinos) ont un spin égal à 1/2. Ils sont ainsi dotés d'un moment cinétique propre, qui correspond à une version quantique, plus abstraite, du mouvement classique de rotation propre (comme celui de la Terre autour de l'axe des pôles). Et puisque l'électron et le muon sont des particules portant une charge électrique, cette « rotation » engendre un champ magnétique. En conséquence, l'électron et le muon se comportent comme des petits aimants, caractérisés par un « moment magnétique ».

DE PETITS AIMANTS

L'expression théorique du moment magnétique de spin contient un facteur sans dimension noté g et nommé facteur de Landé. En 1928, le physicien britannique Paul Dirac a proposé une équation qui porte aujourd'hui son nom et qui généralise au cas de particules relativistes (c'est-à-dire de vitesse non négligeable par rapport à celle de la lumière) et de spin 1/2 la célèbre équation de Schrödinger de la mécanique quantique. Il a alors montré qu'il pouvait calculer le facteur g de l'électron, ce qu'il qualifiait de « bonus inattendu » de son équation. D'après celle-ci, ce facteur vaut exactement 2.

Or, en 1947, grâce à des mesures spectroscopiques, Polykarp Kusch et Henry Foley, de l'université Columbia, à New York, ont montré que le facteur g de l'électron est légèrement supérieur à 2, de l'ordre de 0,1 %. L'anomalie correspondant à la différence entre le facteur de Landé de la particule et la valeur donnée par l'équation de Dirac, soit $g-2$, est nommée, par abus de langage, « moment magnétique anomal » (le terme « anomal » est plus approprié que l'adjectif « anormal » parfois utilisé). Sa mise en évidence a été le point de départ d'un développement parallèle : les expérimentateurs cherchaient à en affiner la mesure, tandis que les théoriciens s'évertuaient à calculer l'anomalie avec la plus grande précision possible.

Pour les théoriciens, l'équation de Dirac était clairement insuffisante pour calculer le moment magnétique de l'électron, car elle ne prenait pas en compte les effets des particules virtuelles qui remplissent le vide et qui interagissent avec l'électron. En 1948, dans le cadre de la toute jeune théorie quantique des champs décrivant l'interaction électromagnétique, l'électrodynamique quantique (QED), le physicien américain Julian Schwinger a réalisé les premiers calculs des termes correctifs les plus simples. L'anomalie magnétique de l'électron ainsi obtenue était compatible avec les données expérimentales. Dans les décennies qui ont suivi, mesurer le moment anomal de l'électron a servi de test pour la QED et permis de vérifier que les chercheurs calculaient correctement des processus virtuels toujours plus complexes.

© Fermilab/Reidar Hahn

La mesure la plus récente (en 2011) du moment magnétique anomal de l'électron, réalisée avec une précision de l'ordre de 10^{-12}, a montré que l'expérience et la théorie sont en accord avec une précision de 10^{-9} ! Cela fait de la QED l'une des théories les mieux testées en physique.

Au cours des années 1960 et 1970, la description des interactions des particules élémentaires s'est cristallisée sous la forme du modèle standard, dont la QED décrit la partie électromagnétique. Il est alors devenu plus intéressant de mesurer l'anomalie magnétique du muon, plutôt que celle de l'électron. Le muon étant près de 200 fois plus lourd que l'électron, il est beaucoup plus sensible aux effets des particules virtuelles (on montre qu'il y a $200^2 = 40\,000$ fois plus de chances de voir apparaître des particules virtuelles lourdes dans le voisinage du muon) et devrait donc être plus sensible à la présence de particules non incluses dans la théorie.

Le muon est donc prometteur pour mettre à l'épreuve le modèle standard. Si l'on observait un désaccord entre la prédiction théorique et l'expérience (en prenant en compte leurs incertitudes), ce serait le signe manifeste que le modèle standard est incomplet. Concrètement, cela signifierait que des particules virtuelles ou une force très faible non prévues dans le modèle standard contribuent à la valeur expérimentale, mais n'ont pas été intégrées dans le calcul théorique des termes correctifs.

Le facteur de Landé du muon, calculé à partir de l'équation de Dirac, est égal à 2, comme pour l'électron. L'estimation des corrections quantiques est cependant plus complexe, car il faut prendre en compte non seulement la contribution des photons et des leptons virtuels (grâce à la QED, comme dans le cas de l'électron), mais aussi celle des bosons virtuels associés à la théorie de l'interaction faible (W, Z et Higgs) et celle du secteur des hadrons, terme qui désigne les particules sensibles à l'interaction forte.

Les hadrons sont décrits par la chromodynamique quantique (QCD), la théorie de l'interaction forte qui est véhiculée par les gluons. Les quarks et les gluons sont les seules particules élémentaires sensibles à cette force, et les quarks s'assemblent en paires quark-antiquark ou en triplets de quarks (le proton et le neutron, composés chacun de trois quarks, sont deux exemples de hadrons). Les calculs de ces effets étant très difficiles, une méthode de calcul indirecte a été développée au début des années 1960 pour évaluer la contribution hadronique dominante au moment magnétique anomal du muon

Les physiciens ont analysé en « aveugle » pour ne pas introduire de biais dans l'exploitation des données

6 %

seulement des données de l'expérience *Muon g – 2* ont été analysées pour l'heure

(voir l'entretien avec L. Lellouch, page 68). Elle est fondée sur une exploitation théorique des données provenant des collisionneurs électron-positron et est limitée par la précision de ces dernières.

Néanmoins, ces vingt dernières années, ce volet théorique a connu d'importants progrès. En 2020, après trois ans de travail de synthèse, une collaboration internationale de plus de 130 chercheurs a évalué ces incertitudes en utilisant en particulier les données récentes et précises des expériences *BaBar*, au Slac, en Californie, et *Kloe*, en Italie. Ils ont publié une valeur théorique de référence pour l'anomalie magnétique du muon : $a_{\text{théorique}} = (g-2)/2 = 116\,591\,810(43) \times 10^{-11}$.

DES EXPÉRIENCES QUI ONT DÉBUTÉ DANS LES ANNÉES 1960

De leur côté, les expériences visant à mesurer avec précision l'anomalie magnétique du muon ont débuté dans les années 1960, au Cern, notamment sous l'impulsion de Georges Charpak. Les résultats successifs n'ont montré aucun signe d'incompatibilité avec la théorie… jusqu'en 2001. C'est pourquoi les conclusions de l'expérience *E821*, à Brookhaven, ont été accueillies avec enthousiasme. L'équipe avait obtenu une mesure du moment magnétique significativement différente de la valeur théorique calculable à l'époque. Les physiciens de Brookhaven avaient-ils trouvé une faille dans le modèle standard ? Face à un enjeu aussi crucial, une confirmation indépendante par une expérience plus précise semblait nécessaire.

En 2013, le cœur de l'expérience *E821*, un aimant de 700 tonnes en forme d'anneau, a été déménagé par bateau et par camion pour être installé au Fermilab et y profiter d'un faisceau de muons plus pur et plus intense. Parti de Long Island près de New York, il a longé la côte Atlantique, le golfe du Mexique, remonté le fleuve Mississippi puis l'Illinois pour arriver à destination, après un périple de près de 5 000 kilomètres. L'expérience *Muon g – 2* est donc une version notablement améliorée de celle de Brookhaven. Des modifications importantes vont permettre à terme de gagner un facteur 4 sur la précision de mesure.

L'expérience *Muon g – 2* a commencé à réaliser des mesures en 2018. Son principe ? Un accélérateur de Fermilab produit un faisceau de protons de haute énergie qui bombarde une cible *(voir la figure page ci-contre)*. De nombreuses particules instables émergent de cette collision, dont des pions qui se désintègrent en produisant des muons (positifs, ou antimuons). Ces derniers sont polarisés de telle façon que leur spin soit aligné avec leur direction de déplacement. Ils sont ensuite injectés dans un «anneau de stockage», une enceinte circulaire de 14,2 mètres de diamètre.

Un ensemble d'aimants produit un puissant champ magnétique vertical de 1,45 tesla, qui oblige les particules à circuler dans l'anneau suivant une trajectoire circulaire. Le champ magnétique interagit aussi avec le spin des antimuons ; en conséquence, ces spins décrivent un mouvement de précession (comparable au mouvement de précession de la Terre ou d'une toupie, dont l'orientation de l'axe de rotation change au cours du temps et décrit un cône).

Si le facteur de Landé g de l'antimuon était exactement égal à 2, la période de précession du spin serait égale à celle de la circulation des particules dans l'anneau ; le spin pointerait alors toujours dans la direction du mouvement de la particule. Mais comme g est légèrement supérieur à 2, le spin change progressivement d'orientation par rapport à la trajectoire et se réaligne avec la direction du mouvement tous les 27 tours environ.

Les antimuons étant des particules instables, ils finissent par se désintégrer en émettant deux neutrinos et un positron (l'antiparticule de l'électron). Ce dernier est émis préférentiellement

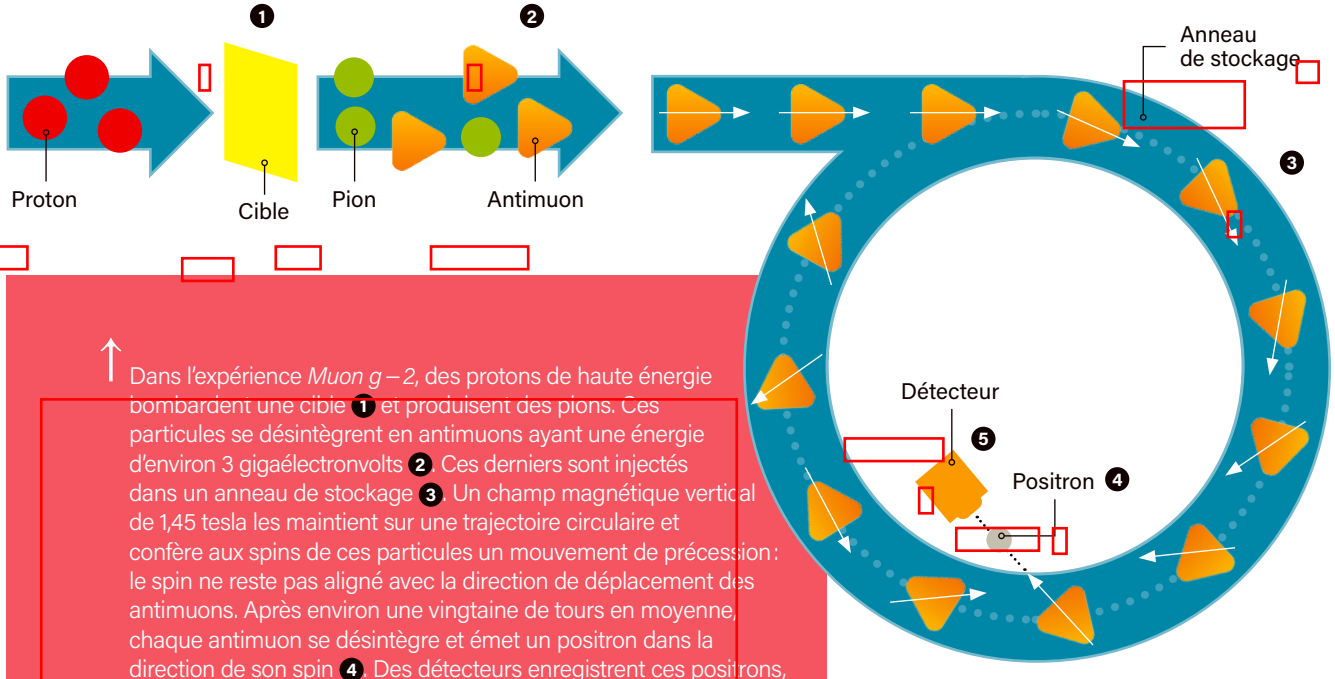
dans la direction du spin et son énergie est maximale quand le spin est dans la direction du mouvement. Le long de l'anneau, 24 détecteurs sont installés. Le nombre de positrons qu'ils détectent oscille au cours du temps suivant une fréquence dont l'analyse permet de remonter à la valeur du moment magnétique du muon.

Les physiciens ont réalisé leur analyse en « aveugle ». Cette technique couramment utilisée en physique des particules consiste à construire toute la chaîne d'analyse jusqu'au bout sans avoir accès aux vraies valeurs, en l'occurrence la fréquence réelle d'oscillation du flux de positrons. L'idée est de ne pas introduire de biais dans l'exploitation des données, par exemple en ajustant même de façon inconsciente certaines variables pour que le résultat aille dans le sens le plus intéressant. À la fin, une fois la fréquence révélée, l'équipe a calculé la valeur de l'anomalie magnétique : $a_{\text{expérimental}} = 116\,592\,061(41) \times 10^{-11}$. Elle confirme le résultat de *E821* et établit un écart de 251×10^{-11} avec la valeur théorique $a_{\text{théorique}}$ calculée en 2020. La tension semble se confirmer.

DÉSACCORD DE 4,2 ÉCARTS-TYPES

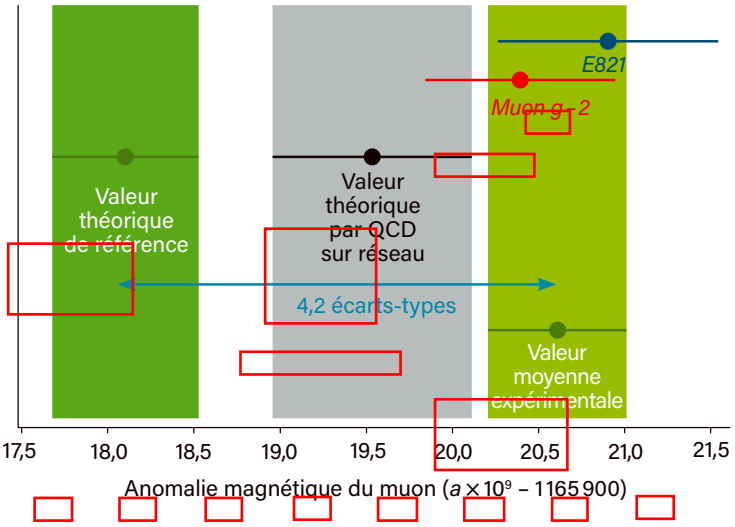
D'un point de vue statistique, la différence entre les valeurs expérimentale et théorique est significative à 4,2 écarts-types. Cela signifie que cette différence n'a que 1 chance sur 40 000 d'être une fluctuation statistique. En physique des particules, un tel résultat statistique est considéré comme solide, mais en général on fixe arbitrairement à 5 écarts-types le seuil requis pour acter une découverte ; le risque d'un artefact n'est alors que de 1 sur 1,7 million.

Il faut cependant souligner que les chercheurs n'ont analysé que 6 % de leurs données. Les mesures de 2019 et 2020 sont en cours de traitement. Avec l'apport de ces dernières, les physiciens augmenteront notablement la précision de leur mesure. Par ailleurs, les expériences *E821* et *Muon g – 2*



Dans l'expérience *Muon g – 2*, des protons de haute énergie bombardent une cible 1 et produisent des pions. Ces particules se désintègrent en antimuons ayant une énergie d'environ 3 gigaélectronvolts 2. Ces derniers sont injectés dans un anneau de stockage 3. Un champ magnétique vertical de 1,45 tesla les maintient sur une trajectoire circulaire et confère aux spins de ces particules un mouvement de précession : le spin ne reste pas aligné avec la direction de déplacement des antimuons. Après environ une vingtaine de tours en moyenne, chaque antimuon se désintègre et émet un positron dans la direction de son spin 4. Des détecteurs enregistrent ces positrons, dont le flux détecté oscille avec la période de précession 5. Or cette période est liée au moment magnétique du muon, ce qui permet d'estimer l'anomalie magnétique de la particule.

© Pour la Science



← Le calcul théorique de référence donne une valeur de l'anomalie magnétique du muon plus basse que la valeur moyenne des deux expériences (*E821* et *Muon g – 2*). En calculant par une méthode différente, la QCD sur réseau, la collaboration BMW a obtenu un résultat plus proche de la valeur expérimentale.

reposant sur le même principe, il sera intéressant de confirmer cette tension avec le modèle standard en mesurant le moment magnétique anomal du muon d'une autre façon. Des physiciens de J-Parc, un centre de recherche au Japon, préparent actuellement une telle expérience, nommée *E34*.

La balle semble donc encore dans le camp des expérimentateurs. Pourtant, une autre équipe de théoriciens, la collaboration «Budapest-Marseille-Wuppertal» (BMW), vient d'annoncer un résultat qui sème le trouble. Pour calculer la contribution hadronique dominante, elle a mis en œuvre une approche distincte grâce à une méthode nommée «chromodynamique quantique sur réseau». Cette technique est dite *ab initio*, car elle n'utilise que les équations du modèle sans paramètres supplémentaires et sans faire intervenir des données d'autres expériences *(voir l'entretien avec L. Lellouch, page 68)*. En combinant leur résultat avec les autres contributions du modèle standard, les chercheurs ont ainsi obtenu la valeur $a_{BMW} = 116591954(57) \times 10^{-11}$.

Cette valeur est plus proche de la mesure expérimentale que la valeur théorique de 2020 *(voir la figure ci-dessus)*. Elle pourrait même rendre caduque la tension entre l'expérience et la théorie ! Mais avant d'en tirer des conclusions définitives, il faudra que le résultat de ce calcul soit confirmé par d'autres équipes et il restera à comprendre pourquoi les deux approches théoriques conduisent à des valeurs différentes.

Si la divergence entre la mesure expérimentale et les prédictions théoriques persistait, ce serait probablement le signe de l'existence d'une «nouvelle physique». Il faudra alors comprendre comment avancer au-delà du modèle standard. Quelle théorie explique le moment magnétique anomal mesuré tout en étant compatible avec toutes les autres expériences de physique des particules ? Il sera difficile d'y voir vraiment clair avec une seule mesure indiquant un accroc dans le modèle standard. L'espoir se trouve peut-être du côté du LHC. De récentes mesures dans l'expérience *LHCb* laissent entrevoir des signes de faiblesse du modèle standard. Mais la robustesse de ce modèle a déjà surpris les physiciens, et risque de le faire encore !

— L'auteur —

> Sean Bailly
est journaliste à *Pour la Science* et docteur en physique.

— À lire —

> B. Abi *et al.* (Collaboration *Muon g – 2*), Measurement of the positive muon anomalous magnetic moment to 0.46 ppm, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 126, article 141801, 2021.

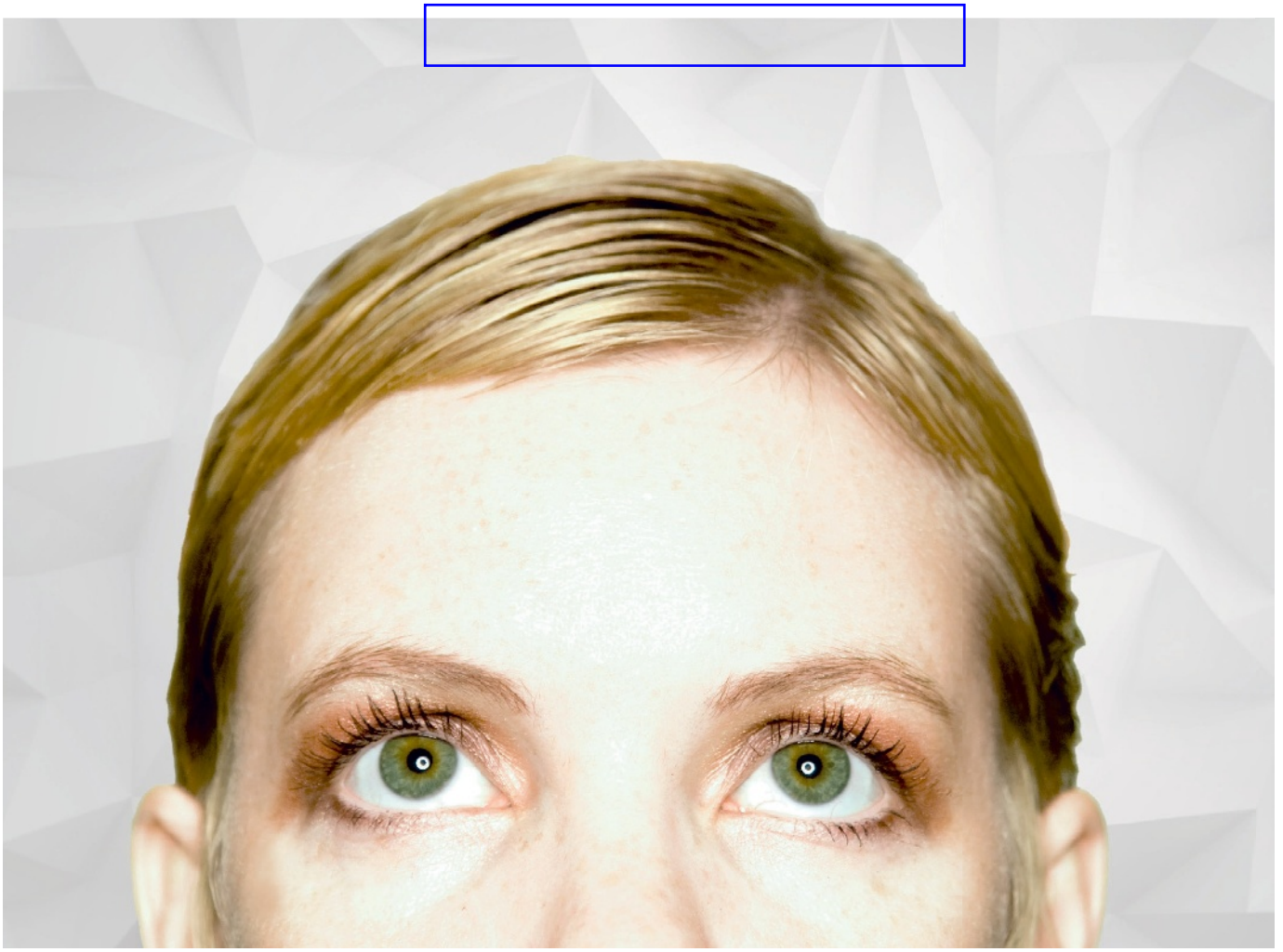
> S. Borsanyi *et al.*, Leading hadronic contribution to the muon magnetic moment from lattice QCD, *Nature*, en ligne le 8 avril 2021.

> R. Aaji *et al.* (Collaboration *LHCb*), Test of lepton universality in beauty-quark decays, prépublication en ligne sur arXiv, 22 mars 2021. https://arxiv.org/abs/2103.11769

© Pour la Science, d'après BMW et Fermilab

AcademiaNet

La base de données qui rassemble toutes les femmes scientifiques de renommée internationale



AcademiaNet offre un service unique aux instituts de recherche, aux journalistes et aux organisateurs de conférences qui recherchent des femmes d'exception dont l'expérience et les capacités de management complètent les compétences et la culture scientifique.

AcademiaNet, base de données regroupant toutes les femmes scientifiques d'exception, offre:

- Le profil de plus des 2.300 femmes scientifiques les plus qualifiées dans chaque discipline – et distinguées par des organisations de scientifiques ou des associations d'industriels renommées
- Des moteurs de recherche adaptés à des requêtes par discipline ou par domaine d'expertise
- Des reportages réguliers sur le thème »Women in Science«

Partenaires

Robert Bosch Stiftung

Spektrum der Wissenschaft

nature

Pour la Science

www.academia-net.org

L'anomalie magnétique du muon, un défi théorique !

Laurent Lellouch

Laurent Lellouch est directeur de recherche au CNRS et responsable de l'équipe de physique des particules au Centre de physique théorique (CNRS/Aix-Marseille Université/ université de Toulon), à Marseille.

À ce niveau de précision, il faut inclure dans les calculs toutes les forces et presque toutes les particules du modèle standard. Théoriciens et supercalculateurs sont à la manœuvre, explique Laurent Lellouch.

Pourquoi les théoriciens s'intéressent-ils à l'anomalie magnétique du muon ?

Dès le milieu des années 1950, les physiciens se sont rendu compte que l'anomalie du moment magnétique du muon était environ 40 000 fois plus sensible que ne l'est celui de l'électron aux effets de particules virtuelles lourdes qui l'entourent, du fait de sa masse plus élevée. Cela en fait une sonde très sensible pour explorer les propriétés du vide quantique. Depuis cette époque, l'expérience et la théorie ont évolué en tandem autour de ce problème, chacune poussant l'autre à progresser. Cette dynamique est devenue d'autant plus importante en 2004 quand les résultats de l'expérience de Brookhaven n'étaient plus en accord avec le calcul théorique. La mesure de *Muon g−2*, à Fermilab, a renforcé cette tension.

Comment interpréter cette tension ?

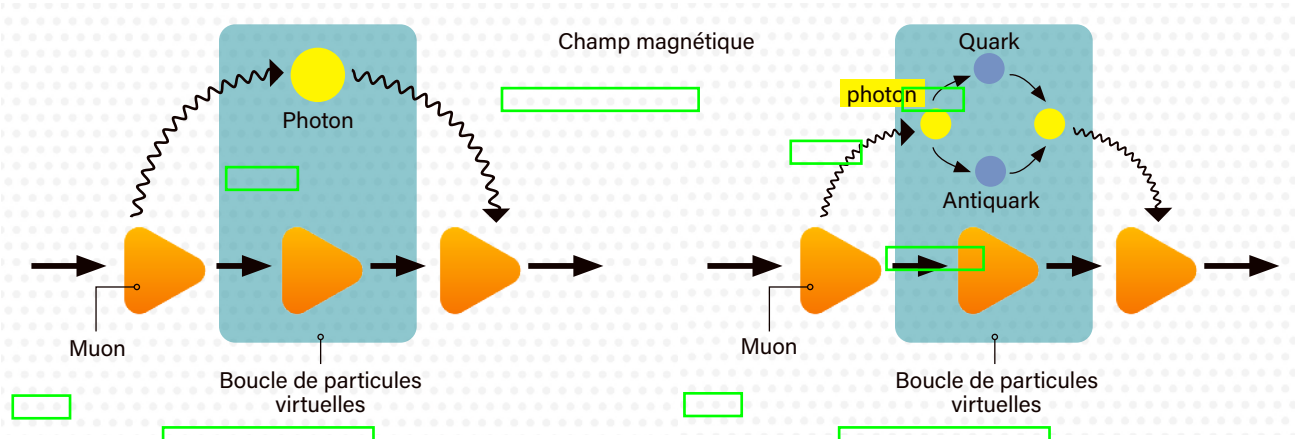
Elle pourrait être le signe d'une faille dans le modèle standard. Mais avant de pouvoir conclure, il faut s'assurer qu'il n'y a pas de problèmes dans l'expérience, d'une part, et dans le calcul théorique, d'autre part. Ce dernier fait appel à des techniques de théorie quantique des champs très poussées. Comme évoqué précédemment, à cause de fluctuations quantiques, le muon est entouré d'une sorte de nuage de particules dites « virtuelles » qui contribuent à ses propriétés, et cela se traduit par des termes correctifs.

Au niveau de précision atteint par l'expérience, il faut inclure toutes les forces et presque toutes les particules décrites par le modèle standard dans le calcul de ces corrections. Par exemple, le muon peut émettre un photon virtuel et le réabsorber. Ce processus et le calcul correspondant peuvent être représentés par un diagramme de Feynman simple, dit « du premier ordre » *(voir la figure page suivante)*. Mais on peut imaginer que le photon virtuel se transforme en une paire électron-positron qui, très vite, s'annihile et donne un photon. C'est un diagramme du deuxième ordre. La contribution des leptons et des photons est calculée grâce à une théorie développée dans les années 1940, l'électrodynamique quantique (QED). Les physiciens savent calculer cette contribution jusqu'au cinquième ordre, ce qui représente près de 13 000 diagrammes de Feynman. On calcule aussi la contribution des bosons W et Z jusqu'au deuxième ordre. Reste le secteur hadronique, avec les quarks et les gluons.

Ce dernier pose-t-il un problème ?

Ses corrections contribuent à une faible partie de l'anomalie magnétique du muon. Mais, parce que les équations de la théorie qui décrivent les interactions des quarks et des gluons sont hautement non linéaires, les calculs sont complexes, les incertitudes associées sont difficiles à contrôler et sont importantes. La composante dominante de cette correction correspond à une situation dans laquelle le muon émet un photon qui disparaît

© Annemarie C. Lellouch



↑ Dans l'expérience *Muon g – 2*, le moment magnétique anomal du muon est mesuré à partir du mouvement de précession du spin de cette particule plongée dans un champ magnétique. La valeur du moment magnétique dépend en partie des particules virtuelles que le muon émet et absorbe en permanence. Dans le cas le plus simple *(à gauche)*, le muon émet un photon puis l'absorbe. C'est la contribution principale à l'anomalie magnétique du muon. Parfois, le photon émis peut donner naissance à une paire quark-antiquark ***(à droite)***. Cette composante hadronique est difficile à calculer et, de ce fait, soumise à d'importantes incertitudes.

en créant une «bulle hadronique», laquelle se retransforme en un photon qui est absorbé par le muon. Cette bulle hadronique peut être juste une paire quark-antiquark, mais aussi des choses plus riches avec des gluons, plusieurs paires quark-antiquark, qui forment des hadrons…

Comment calcule-t-on cette contribution hadronique ?

Une première approche a été proposée en 1961, bien avant la naissance de la chromodynamique quantique (QCD), la théorie des champs qui décrit les interactions des quarks et des gluons. L'idée repose sur des principes très fondamentaux et des mesures expérimentales. Dans les collisionneurs électron-positron, les physiciens observent la formation de nombreux hadrons, des particules composées de quarks, principalement des mésons rho ou des pions. Or un théorème de physique ondulatoire appliqué à la physique quantique, le «théorème optique», combiné à des méthodes d'analyse complexes, permet de relier la section efficace de formation de hadrons donnés (une grandeur associée à la probabilité de produire ces particules) à la contribution virtuelle de ces hadrons à différents processus. À partir des mesures expérimentales des collisionneurs, il est alors possible d'estimer les corrections virtuelles qui entrent dans le calcul du moment magnétique anomal du muon.

Ces mesures ont été faites maintes fois et les calculs, même s'ils sont difficiles, ont été méticuleusement vérifiés, notamment par l'équipe de Michel Davier, de l'université Paris-Saclay. L'approche est robuste. Pour cette raison, l'écart entre ce résultat théorique et les mesures expérimentales pourrait vraiment être un indice fort d'une faille dans le modèle standard. Cependant, pour de nombreux physiciens, l'idée de remettre en cause le modèle standard en s'appuyant sur une seule approche théorique n'était pas très rassurante. Il fallait donc développer une autre méthode indépendante.

En quoi consiste-t-elle ?

Il s'agit de partir des équations de base de la QCD et de calculer directement les corrections. Dans cette théorie, des champs décrivent en tout point de l'espace-temps les quarks et leurs interactions. C'est la même idée qu'une carte météorologique qui indique la température en chaque endroit, sauf qu'ici chaque point est associé à une centaine de paramètres correspondant aux différentes particules du modèle. Dans un espace-temps continu, on a donc une infinité de valeurs

© Pour la Science

et les calculs sont impossibles à mener. Une approche, la QCD sur réseau, consiste à discrétiser l'espace-temps selon un réseau hypercubique (comprenant les trois dimensions d'espace et une dimension de temps) dont la maille a une certaine longueur a. Les champs associés aux quarks prennent des valeurs uniquement sur les nœuds des mailles et ceux associés aux gluons seulement sur les liens entre deux nœuds voisins. On peut alors exprimer la QCD dans un formalisme de physique statistique, et les calculs deviennent possibles sur ordinateur. Par des méthodes éprouvées, on fait ensuite tendre a vers zéro pour retrouver le cas physique d'un espace-temps continu.

Grâce à cette approche, on passe d'une infinité de variables à un nombre fini, mais qui se compte tout de même en milliards sur les réseaux les plus grands. Il faut alors une puissance de calcul colossale pour traiter un problème donné.

C'est l'approche que vous avez suivie ?

Avec des collègues de l'université Loránd-Eötvös, à Budapest, du Centre de physique théorique, à Marseille, et de l'université de Wuppertal, en Allemagne, entre autres, nous avons exploré cette piste. En 2008, nous avons d'abord considéré un problème plus simple (le calcul de la masse du proton) pour confirmer que l'approche de la QCD sur réseau fonctionnait. Puis, en 2015, nous avons introduit la QED dans nos simulations pour calculer la petite différence de masse entre le neutron et le proton. Nous nous sommes ensuite concentrés sur le calcul du moment magnétique anomal du muon et la contribution hadronique. Pour cela, nous avons dû prendre en compte de nombreux effets, y compris de petits effets négligés jusque-là. Pour arriver au résultat, des supercalculateurs ont été nécessaires, en Allemagne et en France : notamment Turing et le tout nouveau Jean-Zay, de l'Idris, au CNRS, et Joliot-Curie, du TGCC, au CEA.

Quel résultat avez-vous obtenu ?

Nous avons obtenu un moment magnétique anomal du muon très proche de la valeur expérimentale. Ce résultat arrive un peu à contre-courant de celui de référence, dont la valeur est plus faible et en tension avec les expériences. Il suggère que le modèle standard pourrait encore être compatible avec les mesures de Brookhaven et de Fermilab.

Soit nous resterons compatibles avec « Muon g–2 », soit une tension apparaîtra. Le suspense est entier.

Mais l'équipe de *Muon g–2* n'a analysé que 6 % de ses données. En accumulant plus de mesures, elle réduira ses barres d'erreur d'un facteur proche de 4. Selon l'évolution de leur résultat et des progrès théoriques que nous ferons, soit nous resterons compatibles, soit une tension va apparaître. Le suspense est entier. Par ailleurs, la situation théorique reste à éclaircir. Pourquoi les deux approches théoriques ne donnent-elles pas le même résultat ?

Comment y voir plus clair ?

D'autres équipes utilisent la QCD sur réseau pour calculer la correction hadronique. Nous attendons avec impatience leurs conclusions pour voir si elles confirment notre valeur ou si elles se rapprochent du calcul de référence. Dans le cas où ces autres groupes arriveraient à des résultats similaires au nôtre, il restera à comprendre pourquoi les deux méthodes ne s'accordent pas. Même s'il est impossible de regarder terme à terme les différences, nous réfléchissons à des stratégies et j'ai bon espoir que nous trouverons au moins une partie de la réponse.

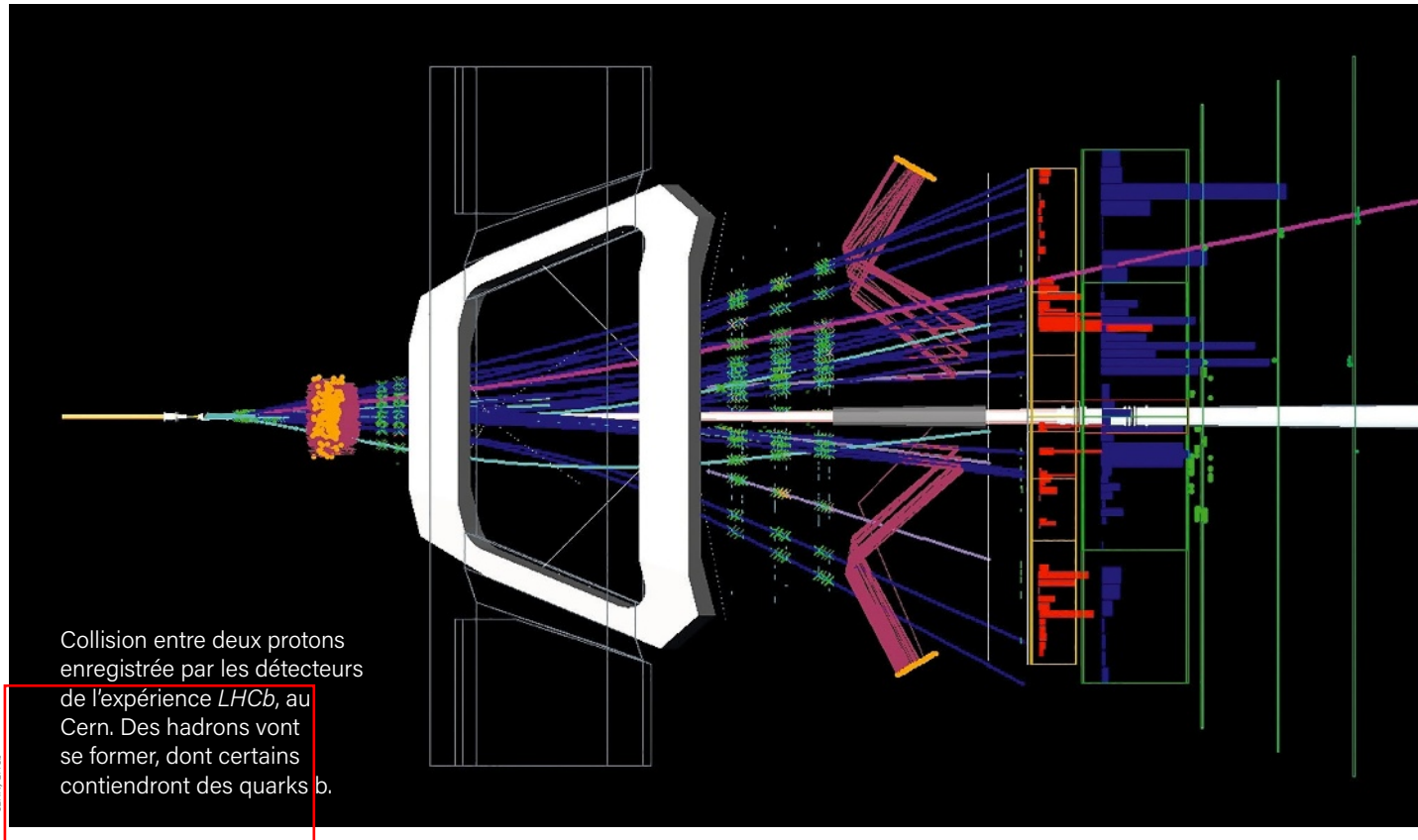
Et la fameuse faille dans le modèle standard ?

Il est trop tôt pour affirmer que le modèle standard a enfin été mis en défaut. Cependant, il est clair que de nombreuses choses nous échappent, car il y a beaucoup de questions fondamentales auxquelles le modèle standard ne répond pas. La physique des particules reste un territoire riche et fascinant à explorer.

Propos recueillis par Sean Bailly

Un quark fait de la résistance

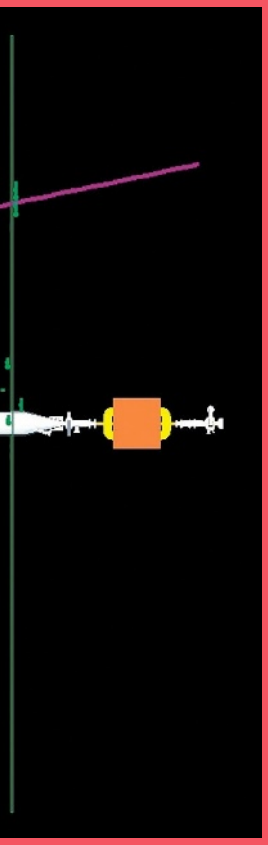
Sébastien Descotes-Genon



Collision entre deux protons enregistrée par les détecteurs de l'expérience *LHCb*, au Cern. Des hadrons vont se former, dont certains contiendront des quarks b.

© CERN, LHCb

Depuis une décennie, les soupçons s'accumulent : le quark b ne se désintègre pas comme le prévoit la théorie. Son b de beauté serait-il aussi celui de blagueur ? Le modèle standard en sera-t-il bouleversé ?



Mardi 19 octobre 2021, près de la frontière franco-suisse. Le Cern entame une semaine de conférences sur les derniers résultats de l'expérience *LHCb*, avec toute une journée consacrée aux « anomalies de saveur ». *LHCb* est l'un des quatre détecteurs géants qui ponctuent l'anneau souterrain du vaste collisionneur nommé LHC ; le « b » minuscule indique qu'on y traque un gibier de choix, le quark b (comme « beauté », ou « bottom »). Quant aux « anomalies de saveur », elles désignent un processus au cours duquel un quark se désintègre en un quark de type (ou « saveur ») différent, en s'écartant des attentes des physiciens. Ce jour-là, donc, près de 600 participants sont inscrits et suivent les sessions, sur place ou en visioconférence. Les résultats annoncés ne font que renforcer un sentiment né voici déjà plusieurs années : certaines désintégrations du quark b s'obstinent à ne pas obéir aux lois du modèle standard. L'enjeu est de taille : peut-on les comprendre ? Marquent-elles le début de la fin pour le modèle standard ?

UN MODÈLE TOUT EN SYMÉTRIES

Avant d'aller plus loin, attardons-nous sur la nature très régulière, symétrique, du modèle standard. Les particules de matière sont rassemblées en trois familles *(voir les Repères, page 6)* de structure très similaire (chacune comprenant deux quarks et deux leptons), de plus en plus massives, mais obéissant de la même manière à trois interactions fondamentales : l'interaction forte, l'interaction faible et l'électromagnétisme. Les leptons chargés (qui existent en trois saveurs : électron, muon et tau) ne sont sensibles qu'aux interactions faible et électromagnétique, et les neutrinos seulement à l'interaction faible. En revanche, les quarks sont sensibles aux trois, et en particulier à l'interaction forte, qui les contraint à rester groupés dans des hadrons comme les protons et les neutrons, des objets composites constitués de quarks, parfois d'antiquarks, et de gluons, ces derniers étant justement les médiateurs de l'interaction forte.

Sur le plan théorique, les équations qui décrivent le comportement de ces particules et leurs interactions s'écrivent en combinant mécanique quantique et relativité. Et en s'appuyant sur des principes mathématiques de symétrie que les théoriciens utilisent pour écrire un objet mathématique unique, le lagrangien, d'où découlent toutes les équations du modèle standard. Si les paramètres initiaux semblent arbitraires (pourquoi des masses différentes ? pourquoi ces choix de charges électriques ?), ces équations sont parfaitement déterminées sur le plan mathématique… mais parfois difficiles à résoudre en pratique. Un gros obstacle

En bref

> Le quark b, l'un des six répertoriés par le modèle standard se désintègre en particules plus légères sous l'effet de la force faible.

> Une décennie d'études en Europe, aux États-Unis et au Japon pointe des anomalies persistantes sur deux types de ses désintégrations.

> Ni les difficultés expérimentales, ni la théorie, ni les fluctuations statistiques ne rendent bien compte de ces anomalies.

> Des explications au-delà du modèle standard postulent l'existence d'une nouvelle interaction ou de nouvelles particules, les leptoquarks.

théorique concerne l'interaction forte : pour les processus qui font intervenir cette interaction, les solutions actuelles ne sont que partielles.

Même si le modèle standard est parfois retors, on peut s'appuyer sur l'existence de ses symétries et constater que les trois familles ont la même sensibilité aux trois interactions fondamentales. C'est en particulier le cas pour les trois saveurs de leptons chargés (à distinguer des leptons de charge électrique nulle que sont les neutrinos) : l'électron (1re saveur), le muon (2e saveur) et le tau (3e saveur) sont de plus en plus massifs, mais tous réagissent de la même façon lorsqu'ils sont soumis aux interactions électromagnétique et faible. C'est l'universalité de la saveur leptonique, testée avec précision et depuis longtemps dans un grand nombre d'expériences. Quoique…

ENTRE DEUX DÉSINTÉGRATIONS, MON CŒUR BALANCE

Depuis près d'une décennie, cette universalité de la saveur leptonique est remise en cause suite aux études approfondies de désintégrations du quark b. Ce compagnon du quark top dans la troisième famille, la plus lourde, est devenu un sujet de choix pour la physique des particules. Massif, il se désintègre en particules plus légères sous l'effet de l'interaction faible. Les probabilités de tel ou tel mode de désintégration sont connues et fournissent des renseignements précieux sur la différence entre quarks et antiquarks dans le modèle standard. Cela explique pourquoi les désintégrations du quark b ont été étudiées en détail dans les expériences *BaBar*, aux États-Unis, et *Belle*, au Japon, dans les années 2000. Elles ont confirmé que chaque quark du modèle standard et son antiquark associé ont, certes, des comportements légèrement différents, mais que toutes ces différences restent en parfait accord avec le modèle standard.

Au LHC du Cern, les physiciens ont poursuivi ce travail, en particulier à travers l'expérience *LHCb* conçue pour étudier les quarks b (et les antiquarks $\overline{b}$) produits lors de collisions très énergétiques entre deux faisceaux de protons. En produisant ce quark en grande quantité, on mesure précisément la probabilité qu'il se désintègre de telle ou telle manière. C'est ainsi que deux types de désintégration ont commencé à surprendre les physiciens, que nous surnommerons par simplicité type 1 et 2 *(voir l'encadré page 76 pour plus de détails)*. Elles sont peu fréquentes et, à chaque fois, le quark b disparaît au profit d'un quark plus léger, mais aussi d'un lepton chargé et de son neutrino (neutre) associé (type 1) ou bien de deux leptons de la même famille et de charges opposées (type 2).

Pour donner du piquant à l'affaire, le quark b, comme les quarks des autres familles, ne s'observe jamais isolé, mais toujours à l'intérieur d'un hadron, à cause de l'interaction forte. Expérimentalement, on rencontre, par exemple, le méson B^- (un quark b et un antiquark $\overline{u}$), le méson B_d (un quark b et un antiquark $\overline{d}$), ou encore le baryon Λ_b (un quark b, un quark u et un quark d). Lors d'une désintégration du quark b en un quark plus léger, les autres quarks constituant le hadron ne sont pas modifiés, ce qui aboutit à un hadron plus léger contenant le quark final.

Obtenir l'une de ces rares désintégrations nécessite de produire en grande quantité des hadrons contenant des quarks b, dans des collisions à très haute énergie de protons comme au LHC, ou d'électrons et de positrons comme dans les expériences *BaBar* ou *Belle*. Autre prérequis : bâtir autour du point de collision un détecteur capable d'identifier les particules issues de chaque désintégration et de mesurer leur énergie et leur vitesse. En accumulant ces données, les désintégrations intéressantes sont identifiées et les probabilités qu'elles se produisent calculées. N'oublions pas que la physique des particules vit dans un monde quantique sans déterminisme : tout phénomène a une certaine chance de se produire… encore faut-il pouvoir la mesurer !

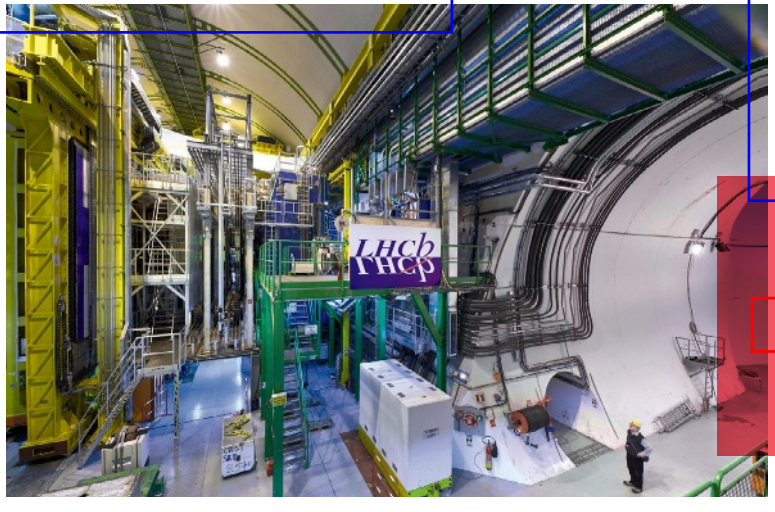
ERREUR OU DÉCOUVERTE ?

Au fil des ans, les résultats se sont accumulés. Les déviations par rapport aux attentes du modèle standard aussi. Pour le type 1 (émission d'un lepton chargé et d'un neutrino), les écarts apparaissent quand un tau apparaît, alors que tout semble normal avec un muon ou un électron. Pour le type 2 (deux leptons de même famille et de charges opposées), des surprises arrivent quand une paire muon-antimuon est produite, alors que rien n'étonne avec une paire électron-antiélectron. Ainsi, toutes ces « anomalies » dépendent de la famille de leptons impliquée, ce qui suggère que l'universalité de la saveur leptonique n'est pas respectée dans les deux types de désintégration. On comprend mieux alors l'intérêt des derniers résultats annoncés en octobre 2021. S'ils ne sont pas significatifs par eux-mêmes, ils confirment le caractère obstinément rebelle du quark b !

Bien sûr, avant d'affirmer que le modèle standard a vécu, les physiciens doivent s'assurer que les déviations du quark b ne proviennent pas de causes plus ordinaires, et donc bien moins excitantes.

Premier biais à écarter : des difficultés expérimentales qui perturberaient l'identification des particules produites, et, en particulier, des leptons chargés. Les physiciens seraient alors confrontés à de « fausses » violations de l'universalité de saveur leptonique. Et il est vrai que cette identification constitue un défi expérimental. Ainsi, les taus ne sont pas identifiés directement dans les détecteurs, mais à partir des particules issues de leur propre désintégration, tandis que les électrons, très légers, ne sont pas toujours faciles à analyser dans l'environnement très agité des collisions entre protons du LHC.

Mais même si la tâche est ardue, il serait très surprenant que les écarts observés résultent d'effets expérimentaux mal maîtrisés. D'une part, les expérimentateurs ont calibré leurs analyses par de nombreuses mesures complémentaires sur des processus déjà bien connus. Ils ont ainsi pu confirmer qu'ils identifiaient correctement les trois types de leptons chargés. D'autre part, les écarts de conduite du quark b ne concernent pas seulement l'universalité de la saveur leptonique. En effet, la désintégration de type 2 produisant une paire muon-antimuon contredit aussi par d'autres aspects les attentes fondées sur le modèle standard, et ce avant même de chercher à la comparer au cas électron-antiélectron. Or ces muons sont très bien identifiés expérimentalement grâce à des sous-détecteurs spécifiques. Invoquer un problème expérimental est donc difficile.



© Maximilien Brice et Julien Marius Ordan/CERN

← À 100 mètres sous la ville de Ferney-Voltaire, le détecteur *LHCb* du Cern (5 600 tonnes) braque ses détecteurs et sous-détecteurs sur les quarks b nés des collisions entre protons.

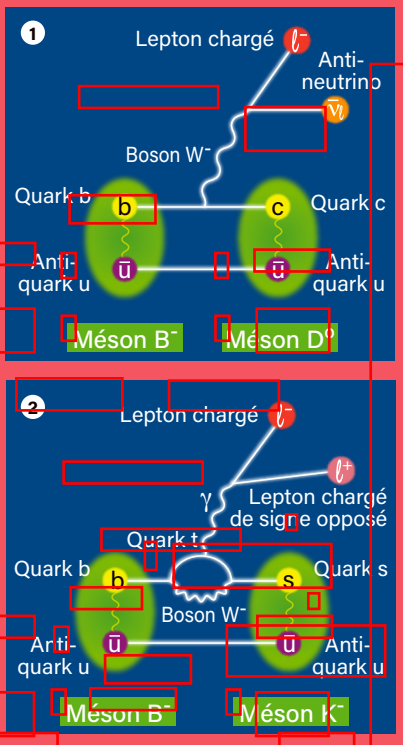
ANATOMIE DES ANOMALIES

La « désintégration de type 1 » dont il est question dans l'article est en fait notée en physique $b \to c\ell^-\bar{\nu}_\ell$. Cela désigne la désintégration d'un quark b en un quark c, un lepton chargé ℓ^- (un électron, un muon, ou un tau) et l'antineutrino associé $\bar{\nu}_\ell$. Dans le modèle standard, elle est possible sous l'effet de l'interaction faible et se produit par l'intermédiaire d'un boson W, médiateur de l'interaction faible, selon le diagramme 1. La « désintégration de type 2 », notée quant à elle $b \to s\ell^+\ell^-$, concerne la désintégration du quark b en un quark s et une paire de leptons chargés de même famille et de signes opposés (soit électron-positron, soit muon-antimuon). Cette désintégration est elle aussi due à l'interaction faible, mais elle nécessite de passer par un état intermédiaire plus compliqué, impliquant un boson W et un quark top 2. Il est possible de passer brièvement par cet état, plus lourd que le quark b initial (le W et le Z sont une vingtaine de fois, et le quark top une quarantaine de fois plus lourds que le quark b), grâce aux propriétés de la mécanique quantique, mais cela rend cette désintégration d'autant plus rare et donc difficile à observer.

Les deux types de désintégration, décrits théoriquement en termes de quarks, sont étudiés expérimentalement en termes de hadrons. Pour le type 1, $b \to c\ell^-\bar{\nu}_\ell$, on peut par exemple étudier un méson B^- (un quark b et un antiquark $\bar{u}$) qui peut se désintégrer en un méson D^0 (un quark c et un antiquark $\bar{u}$), un tau et un antineutrino tau : il s'agit alors du mode $B^- \to D^0\tau^-\bar{\nu}_\tau$. Mais de nombreux autres modes sont possibles, toujours à partir d'un hadron contenant un quark b vers un hadron contenant un quark c, un lepton chargé et un antineutrino. Dans le cadre du modèle standard, on peut prédire précisément les probabilités de désintégration pour certains de ces modes. Il s'avère qu'expérimentalement la probabilité d'obtenir un tau est 10 à 15 % plus faible que celle attendue. En combinant les résultats de *BaBar*, *Belle* et *LHCb* sur deux modes de désintégration différents et en prenant en compte les barres d'erreur, on aboutit à une déviation de 3,4 sigmas, soit une probabilité de moins d'un pour mille que cet écart soit dû à une fluctuation statistique des données. Cela suggère que l'universalité de saveur leptonique présente dans le modèle standard n'est pas respectée par les mesures, et que le tau se comporte différemment des muons et des électrons lors de ces désintégrations.

Pour le type 2, $b \to s\ell^+\ell^-$, on peut là encore étudier différents modes hadroniques, par exemple $B^- \to K^-\mu^+\mu^-$ avec le méson K^- (un quark s et un antiquark $\bar{u}$) et une paire muon-antimuon, mais aussi d'autres désintégrations, toujours à partir d'un hadron contenant un quark b vers un hadron contenant un quark s et une paire de leptons chargés de la même famille, mais de signes opposés. En produisant de très grandes quantités de hadrons contenant des quarks b, la collaboration *LHCb* a fourni de nombreux résultats précis sur les désintégrations, d'une part avec une paire électron-positron, d'autre part avec une paire muon-antimuon.

Il est vite apparu que les mesures sur les muons s'écartent des attentes du modèle standard : les probabilités de désintégration sont trop petites par rapport aux prédictions théoriques, et les particules finales (hadrons, muons, antimuons) sont émises selon des géométries (des directions préférées pour les hadrons et leptons produits) en désaccord avec le modèle standard. En revanche, pour les électrons, tout semble se passer comme prévu. L'universalité de saveur leptonique n'est donc pas respectée non plus pour le type 2.



© Bruno Bourgeois/Pour la Science

Autre écueil à éviter : des erreurs dans les calculs théoriques. Après tout, l'interaction forte intervient pour lier les quarks dans les hadrons, et il est délicat d'estimer correctement son rôle dans les désintégrations expérimentales. Calculs analytiques, simulations numériques… les théoriciens ont redoublé d'efforts pour affiner leurs analyses, confirmant leurs prédictions et diminuant les incertitudes sur leurs calculs. Mieux : ils se sont aperçus que les mesures sur les probabilités de désintégration et la géométrie des produits de désintégration pouvaient être combinées pour former des rapports peu sensibles aux effets de l'interaction forte… mais s'obstinant toujours à dévier par rapport aux attentes. Invoquer des erreurs théoriques n'explique donc pas non plus les déviations observées.

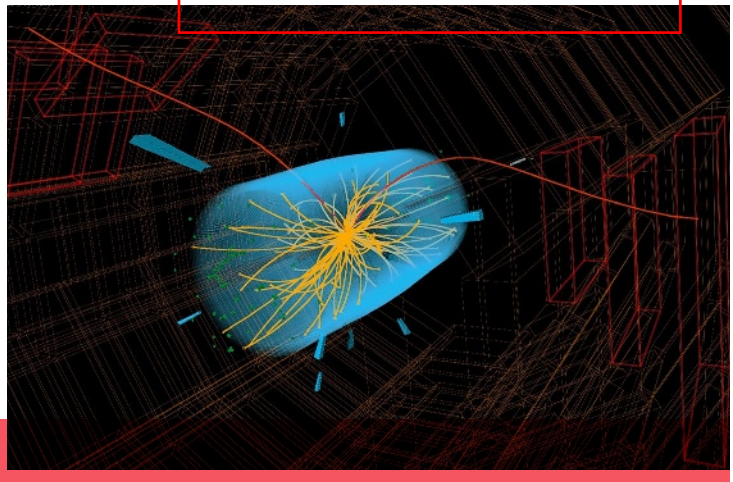
Enfin, des mesures sur des phénomènes quantiques ne sont-elles pas exposées à des fluctuations statistiques ? Certes, mais depuis dix ans, *LHCb* a acquis de plus en plus de données en diminuant les barres d'erreur sur ses mesures : si certaines mesures ont légèrement changé au fil du temps (tout en restant compatibles avec les premières mesures), les déviations ont été confirmées, creusant progressivement l'écart avec le modèle standard.

UN CHANGEMENT, ET TOUT S'EXPLIQUE

En fin de compte, les explications alternatives visant à faire rentrer dans le cadre les observations semblent de plus en plus artificielles. Tandis que celles en termes d'une « nouvelle physique » n'ont rien perdu de leur attrait, bien au contraire. En effet, on peut décrire l'ensemble des données enregistrées sur les désintégrations de type 1 et 2 en modifiant les équations d'une façon très économique. Il suffit d'ajouter un seul terme au lagrangien du modèle standard. Dès lors, non seulement les déviations observées se comprennent (une dizaine mesurées), mais on garantit aussi que les autres caractéristiques de ces désintégrations dévient très peu du modèle, comme cela est effectivement observé (caractéristiques quantifiées par près de 200 valeurs différentes !). Les écarts de conduite du quark b ne sont pas erratiques ; ils forment un motif cohérent en accord avec des extensions simples du modèle standard.

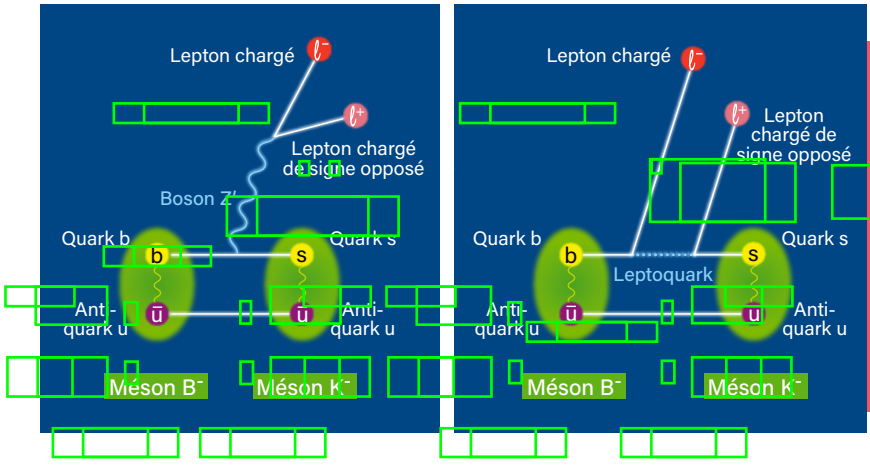
Mais à quel phénomène physique « au-delà du modèle standard » correspondrait ce nouveau terme ? Et pourquoi ne l'a-t-on pas observé plus tôt ? Sur cette deuxième question, les théoriciens spéculent qu'il affecterait de façon importante les quarks et leptons chargés de la troisième famille (t, b, tau), plus modérément ceux de la deuxième (c, s, muon) et très peu ceux de la première (u, d, électron). Les propriétés de la troisième famille, plus lourde, ont été mesurées plus récemment et moins intensément que celles de la deuxième et surtout de la première famille, ce qui expliquerait que nous ayons dû attendre aussi longtemps pour entrevoir ces phénomènes.

Quant au phénomène en cause, il pourrait s'agir par exemple d'une nouvelle interaction, similaire à l'interaction faible et transmise par des bosons inédits W' et Z'. Ou encore de leptoquarks, particules hypothétiques se désintégrant en un quark et un lepton chargé – une bizarrerie de plus puisqu'aucune particule du modèle standard ne se transforme ainsi. Bien que très lourds, ils apparaîtraient de façon transitoire dans certaines désintégrations du quark b et justifieraient ses frasques récentes. Pour autant, les limitations du modèle standard ne seraient pas gommées. Enfin, pas de manière évidente. De nombreux théoriciens sont ainsi tentés d'incorporer ces particules dans des extensions plus vastes du modèle qui répondraient à d'autres questions ouvertes, comme l'origine de la



↑ Bien qu'il n'ait pas été conçu pour cet exercice, le détecteur CMS du Cern épaule occasionnellement son compère *LHCb* dans la chasse aux quarks b. Sur cet événement du 25 juillet 2013, un méson B_s se désintègre en une paire muon-antimuon (*en rouge*).

© CERN. All rights reserved



Les anomalies constatées sur les désintégrations de type 1 ou 2 pourraient s'expliquer par l'existence soit d'une nouvelle interaction portée par des bosons inédits (*à gauche*), soit par des particules nouvelles, les leptoquarks (*à droite*).

matière noire, la grande diversité des masses de particules ou les causes de l'asymétrie entre matière et antimatière dans l'Univers.

Les paramètres de ces modèles étendus commencent d'ailleurs à être très contraints. Ces nouvelles particules ne peuvent pas être trop massives : on veut que le quark b puisse passer par leur intermédiaire pour se désintégrer, ce qui serait impossible si elles étaient très lourdes. Elles ne peuvent pas non plus être trop légères, car, au fil de décennies de recherche dans des collisions à des énergies toujours plus élevées, on les aurait déjà observées. On sait aussi que ces nouvelles particules et interactions engendrent bien souvent des désintégrations interdites par le modèle standard, par exemple une désintégration de type 2, mais avec deux leptons de charges opposées issus de familles différentes (comme un électron et un antimuon). On cherche activement ces événements prohibés dans les données de *BaBar*, *Belle* et *LHCb*, sans succès pour le moment.

Si les derniers résultats de *LHCb* sont encourageants, les physiciens concernés restent prudents sans claironner trop tôt que leur quark favori a mis en échec le modèle standard. Ils souhaitent encore accumuler des données, améliorer la précision des mesures, affiner les calculs théoriques et renforcer leurs outils d'analyse statistique avant de conclure définitivement sur la nature des déviations observées. Le récent redémarrage du LHC après trois ans d'arrêt va permettre à *LHCb* de modifier ses méthodes de sélection des données et ainsi d'accumuler davantage d'informations pertinentes. Bien qu'elles ne soient pas spécifiquement conçues pour l'étudier, les expériences *Atlas* et *CMS* se sont elles aussi lancées dans des programmes d'études du quark b, tout en continuant à chercher si de nouvelles particules, W', Z' ou leptoquarks, n'apparaissent pas dans leurs détecteurs.

Enfin, l'expérience *Belle II* qui vient de démarrer au Japon devrait d'ici quelques années livrer ses premiers résultats sur ces désintégrations, dans un contexte expérimental très différent, où l'identification des divers leptons chargés sera facilitée. Il est donc clair qu'expérimentateurs et théoriciens vont continuer à suivre de près ce quark b décidément rétif à la discipline du modèle. Va-t-il se résoudre à rentrer dans le rang, ou mènera-t-il sa rébellion jusqu'à renverser le modèle standard ?

— L'auteur —

> Sébastien Descotes-Genon est directeur de recherche au CNRS et directeur adjoint du Laboratoire de physique des 2 infinis Irène Joliot-Curie (IJCLab, Cnrs/université Paris-Saclay).

— À lire —

> D. Becirevic *et al.*, Universalité de la saveur leptonique : les trois leptons ont-ils réellement les mêmes propriétés ? *Reflets de la physique*, n°66, Juillet-août 2020.

> S. Bifani *et al.*, Review of Lepton universality tests in B decays, *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics*, vol.46, n°2, 2018.

> Y. Grossman *et al.*, Just a Taste: Lectures on flavor physics, in : *Anticipating the next discoveries in particle physics*, https://arxiv.org/abs/1711.03624, 2016.

© Bruno Bourgeois/Pour la Science

AVEZ-VOUS DES RESSOURCES QUE L'ON ÉCONOMISE QUAND ON RECYCLE ?

EN 2018, 1,3 MILLION DE TONNES
DE PAPIERS ONT ÉTÉ RECYCLÉES.
CE SONT 25 MILLIARDS DE LITRES D'EAU
ÉCONOMISÉS, L'ÉQUIVALENT
DE 8000 PISCINES OLYMPIQUES. ET ÇA,
C'EST GRÂCE À VOTRE GESTE DE TRI.

PLUS D'INFORMATIONS SUR LE RECYCLAGE
SUR TRIERCESTDONNER.FR

CITEO

Donnons ensemble une nouvelle vie à nos produits

Accélérons les accélérateurs

Chandrashekhar Joshi

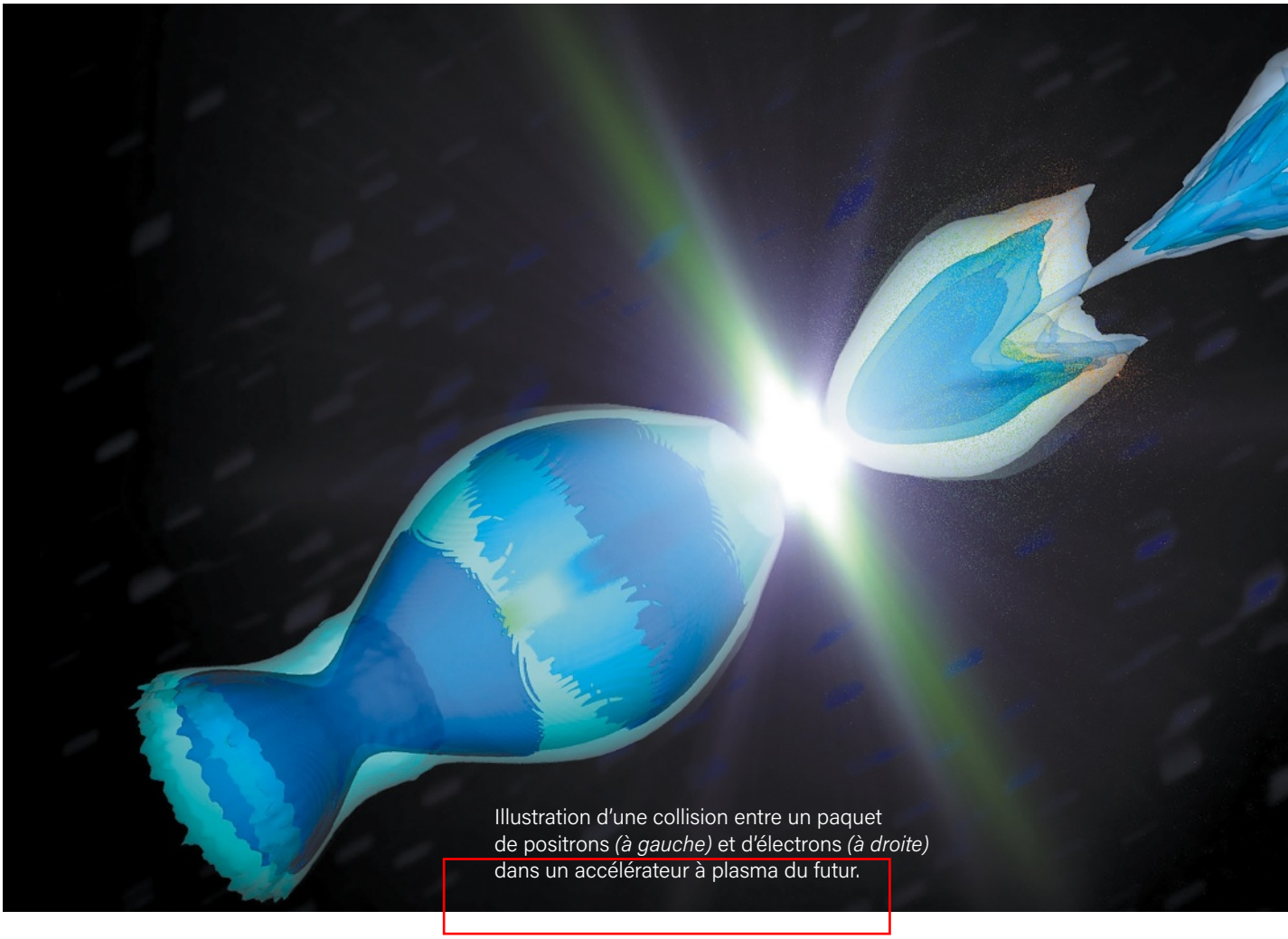


Illustration d'une collision entre un paquet de positrons *(à gauche)* et d'électrons *(à droite)* dans un accélérateur à plasma du futur.

© F. Tsung, W. An/U.C.L.A. and SLAC National Accelerator Laboratory

Indispensables à la recherche, les accélérateurs de particules actuels toucheront prochainement leurs limites. Si leurs successeurs sont déjà à l'étude, les physiciens rêvent d'une technologie de rupture. Et si c'était l'accélération à plasma ?

Vers 1900, les scientifiques en savaient peu sur les briques fondamentales qui constituent notre monde physique. Un siècle plus tard, ils ont découvert non seulement tous les éléments à la base de toute matière observable, mais aussi un éventail de particules encore plus fondamentales qui font le tissu de notre cosmos, notre planète et nous-mêmes. Un outil a rendu possible cette révolution : l'accélérateur de particules.

Pour ces machines, la consécration est arrivée en 2012, quand, au Cern, le Grand collisionneur de hadrons (LHC) a mis au jour le boson de Higgs, depuis longtemps recherché. Le LHC, un anneau de 27 kilomètres de longueur où circulent et se percutent des faisceaux de protons très énergétiques est le plus grand, le plus complexe et le plus cher équipement de ce type jamais construit. Néanmoins, comme l'illustre ce hors-série, nombre d'énigmes demeurent en physique. Pour les résoudre, nous aurons certainement besoin d'un accélérateur encore plus puissant que le LHC. Est-ce réaliste ?

De nombreux scientifiques soutiennent la construction d'un Collisionneur linéaire international (ILC), en forme de ligne droite, qui produira des énergies de collision à hauteur de 250 milliards (giga) d'électronvolts (GeV). Il ne serait pas aussi puissant que le LHC (qui atteint 14 000 GeV, soit 14 TeV), mais l'ILC ferait entrer en collision des électrons avec leur équivalent d'antimatière, les positrons – tous deux des particules fondamentales desquelles on attend des données bien plus « propres » que celles produites par les collisions proton-proton du LHC. Malheureusement, la conception de l'ILC nécessite une infrastructure d'environ 20 kilomètres de longueur et devrait coûter plus de 10 milliards de dollars, un montant si élevé qu'aucun pays ne s'est engagé à l'accueillir.

En même temps, des plans sont établis pour faire croître l'énergie du LHC jusqu'à 27 TeV en augmentant la force des aimants supraconducteurs utilisés pour infléchir la course des protons. Au-delà, le Cern propose un collisionneur électron-positron, puis proton-proton de 100 kilomètres de circonférence, appelé le Futur collisionneur circulaire (FCC). Une telle machine pourrait atteindre le niveau d'énergie sans précédent de 100 TeV pour les collisions proton-proton. Mais son coût égalera, voire surpassera sans doute celui de l'ILC. Même s'il voyait le jour, il n'entrerait pas en service avant que le LHC ne cesse d'être exploité, après 2035.

Mais toutes ces machines gargantuesques ne sont pas les seules options. Depuis les années 1980, les physiciens en ont développé d'autres. Parmi elles, un accélérateur à plasma très prometteur. Les énergies atteintes seraient de l'ordre du TeV, de manière bien plus compacte et bien moins chère que les machines fondées sur la technologie actuelle.

LE ZOO DES PARTICULES

L'histoire des accélérateurs à particules a commencé en 1897, au laboratoire Cavendish de physique de l'université de Cambridge. Là, Joseph John Thomson a créé la première version d'un accélérateur de particules en utilisant un tube cathodique comme ceux de la plupart des télévisions avant l'arrivée des écrans plats. Il a alors découvert une particule chargée négativement – l'électron.

Peu après, les physiciens ont identifié protons et neutrons en utilisant des particules radioactives comme projectiles pour bombarder des atomes. Puis, dans les années 1930, arriva le premier accélérateur circulaire de particules. De la taille de la paume d'une main, il fut inventé par Ernest Lawrence, baptisé « cyclotron », et accélérait les protons à environ 80 kilovolts. Par la suite, la technologie a évolué rapidement, et les scientifiques ont pu augmenter l'énergie des particules chargées accélérées pour sonder le noyau atomique. Ces avancées ont conduit à la découverte d'un zoo de centaines de particules subnucléaires, lançant l'ère de la physique des hautes énergies fondée sur les accélérateurs. Tandis que l'énergie des faisceaux d'accélérateur a rapidement augmenté dans le dernier quart du siècle, on s'est rendu compte que le zoo se réduisait à 17 particules élémentaires prédites par le modèle standard *(voir les Repères, page 6)*. À l'exception du boson de Higgs, elles ont toutes été découvertes lors d'expériences d'accélération avant la fin des années 1990. La détection tant attendue du boson de Higgs au LHC a fait du modèle standard l'accomplissement de la physique des particules.

En plus de figurer parmi les instruments scientifiques les plus aboutis de l'histoire, les accélérateurs ont trouvé une multitude d'applications en médecine et dans nos vies quotidiennes. Ils sont utilisés dans les scanners à tomodensitométrie, pour produire des rayons X servant à la radiographie des os et pour les traitements de tumeurs malignes par radiothérapie. Ils sont vitaux pour la stérilisation des aliments et pour créer des isotopes radioactifs servant à une myriade de traitements et tests médicaux. Ils sont aussi à la base des lasers à électrons libres utilisés par des milliers de scientifiques et d'ingénieurs pour mener des recherches de pointe en sciences physiques et biologiques.

En bref

> Les progrès de la physique fondamentale au XXe siècle sont intimement liés à ceux des accélérateurs.

> La technologie actuelle par accélération dans des cavités à radiofréquence a touché ses limites.

> L'accélération par laser ou faisceaux d'électrons dans un plasma pourrait accélérer 1000 à 10 000 fois les particules, jusqu'à 1 TeV d'énergie.

> Cette technologie, baptisée « accélération à plasma », devra, pour s'imposer, surmonter d'importants obstacles techniques.

LES BASES DE L'ACCÉLÉRATEUR

Les accélérateurs existent sous deux formes : circulaire (synchrotron) et linéaire (linac). Tous sont alimentés par des ondes radio ou des microondes qui accélèrent les particules à une vitesse proche de celle de la lumière. Au LHC, par exemple, deux faisceaux de protons filant dans des directions opposées passent à plusieurs reprises par des « cavités à radiofréquence » espacées le long de l'anneau. Les ondes radio à l'intérieur de ces cavités créent des champs électriques qui oscillent entre positif et négatif pour assurer que les protons chargés positivement soient toujours attirés vers l'avant. Cette attraction accélère les protons et leur transfère de l'énergie. Une fois que les particules ont gagné assez d'énergie, des lentilles magnétiques concentrent les faisceaux de protons sur des points très précis de collision le long de l'anneau. Quand ils se percutent, on obtient des densités d'énergie extrêmement hautes, ce qui conduit à la naissance de nouvelles particules de masse plus importante.

Quand des particules chargées circulent dans un anneau, elles émettent un « rayonnement synchrotron ». Pour tout rayon donné du cercle, la perte d'énergie est bien moindre pour les particules plus lourdes comme les protons ;

L'évolution rapide des technologies d'accélérateurs a conduit à la découverte d'un zoo de centaines de particules subnucléaires

c'est pourquoi le LHC est un collisionneur de protons. Mais pour les électrons, la perte devient trop grande, surtout quand leur énergie augmente. En conséquence, les futurs accélérateurs qui visent à entrechoquer électrons et positrons à très haute énergie devront soit être linéaires, soit avoir un rayon qui minimise la courbe et, par conséquent, le rayonnement synchrotron.

La taille d'un accélérateur pour un faisceau d'énergie donné dépend *in fine* de la puissance en radiofréquences qui peut être injectée dans la structure accélératrice avant qu'elle ne subisse une panne électrique (ou « claquage »). Jusqu'à présent, les accélérateurs traditionnels utilisaient le cuivre pour cette structure accélératrice, et le seuil de claquage impliquait que l'énergie maximale pouvant être fournie s'échelonnait entre 20 et 50 millions d'électronvolts (MeV) par mètre. Les spécialistes de l'accélération ont expérimenté de nouvelles structures qui fonctionnent à de plus hautes fréquences, repoussant par conséquent le seuil de claquage. Ils ont aussi travaillé à améliorer la force des champs accélérateurs au sein des cavités supraconductrices qui sont maintenant utilisés systématiquement dans les synchrotrons et les linacs. Ces avancées essentielles sont et seront introduites avant qu'un concept révolutionnaire ne vienne bousculer les technologies des accélérateurs actuels.

D'autres approches seront peut-être nécessaires un jour. En 1982, aux États-Unis, le programme du Département de l'énergie sur la physique des hautes énergies a lancé une initiative modeste pour étudier de toutes nouvelles façons d'accélérer les particules chargées. Ce programme a accouché de nombreuses idées ; trois d'entre elles paraissent particulièrement prometteuses.

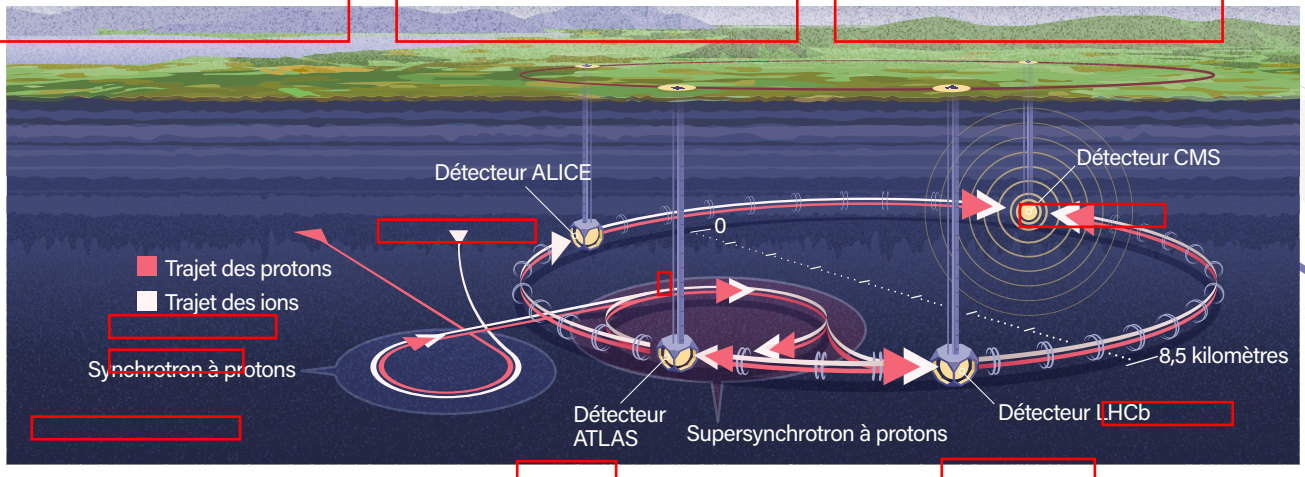
La première est l'accélération à deux faisceaux. Ce procédé fait appel à un faisceau primaire d'électrons constitué d'impulsions de très forte charge afin de créer dans une cavité un rayonnement de très haute fréquence transféré ensuite vers une deuxième cavité pour accélérer une impulsion d'électrons secondaire. Ce concept est testé au Cern, sur une machine appelée Collisionneur linéaire compact (Clic).

Une autre idée consiste à percuter entre eux des muons, cousins des électrons, mais bien plus lourds. Leur masse plus élevée leur permet d'être accélérés dans un cercle sans perdre autant d'énergie que les électrons par le rayonnement synchrotron. Inconvénient : les muons sont des particules instables, avec une durée de vie de 2 millionièmes de seconde. Ils sont produits durant la désintégration de particules appelées « pions », qui elles-mêmes doivent être produites par la collision d'un faisceau intense de protons avec une cible spéciale.

Enfin, il y a l'accélération à plasma. L'idée est née dans les années 1970, quand John Dawson, de l'université de Californie, à Los Angeles, proposa d'utiliser un champ de sillage plasma produit par une impulsion laser intense ou un paquet d'électrons pour accélérer un deuxième paquet de particules 1 000 ou même 10 000 fois plus rapidement que dans les accélérateurs conventionnels. Ce concept d'accélérateur à plasma a soulevé l'enthousiasme en faisant miroiter la possible miniaturisation de ces géants, de la même

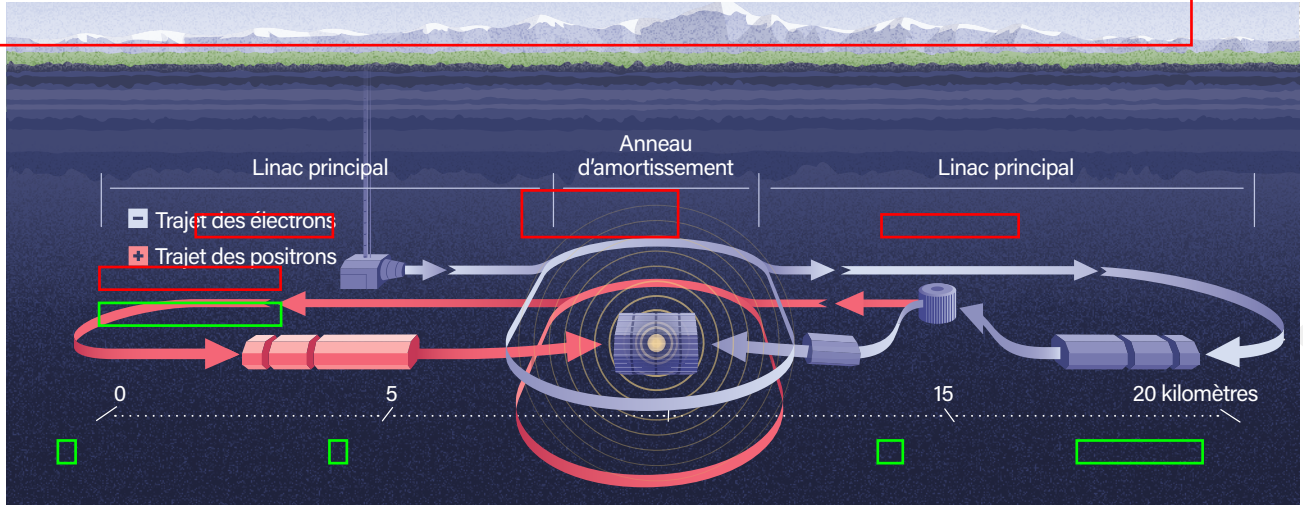
COLLISIONNEURS : VERS UNE NOUVELLE GÉNÉRATION

Les collisionneurs en exercice utilisent des ondes électromagnétiques pour créer des champs électriques capables d'accélérer des faisceaux de particules chargées et de guider leur collision. S'il fait figure de plus grosse machine jamais construite, et bien qu'il ait conduit avec succès la chasse au boson de Higgs, le LHC atteindra sans doute ses limites d'ici à 2035. Pour progresser, la physique des particules aura besoin de nouveaux appareils, plus puissants et, idéalement, moins coûteux. Piste prometteuse : celle des accélérateurs à plasma.



LHC : un géant tout en courbes

Le Grand collisionneur de hadrons (Large Hadron Collider, ou LHC) héberge dans son anneau de 27 kilomètres de circonférence, enterré sous la frontière franco-suisse, des collisions entre protons à une énergie de 14 TeV. Les protons sont accélérés par des passages successifs dans des synchrotrons. Plus rarement, on y télescope aussi des ions de plomb.



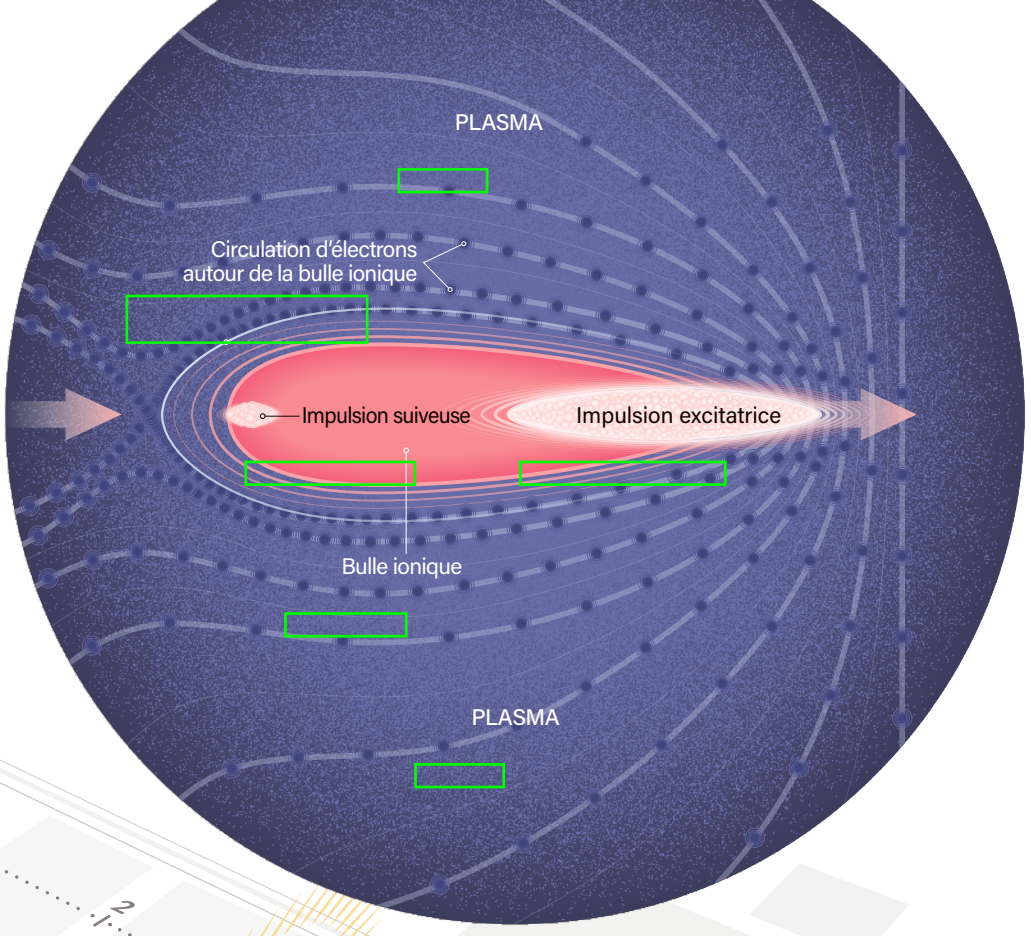
ILC : un successeur droit dans ses bottes

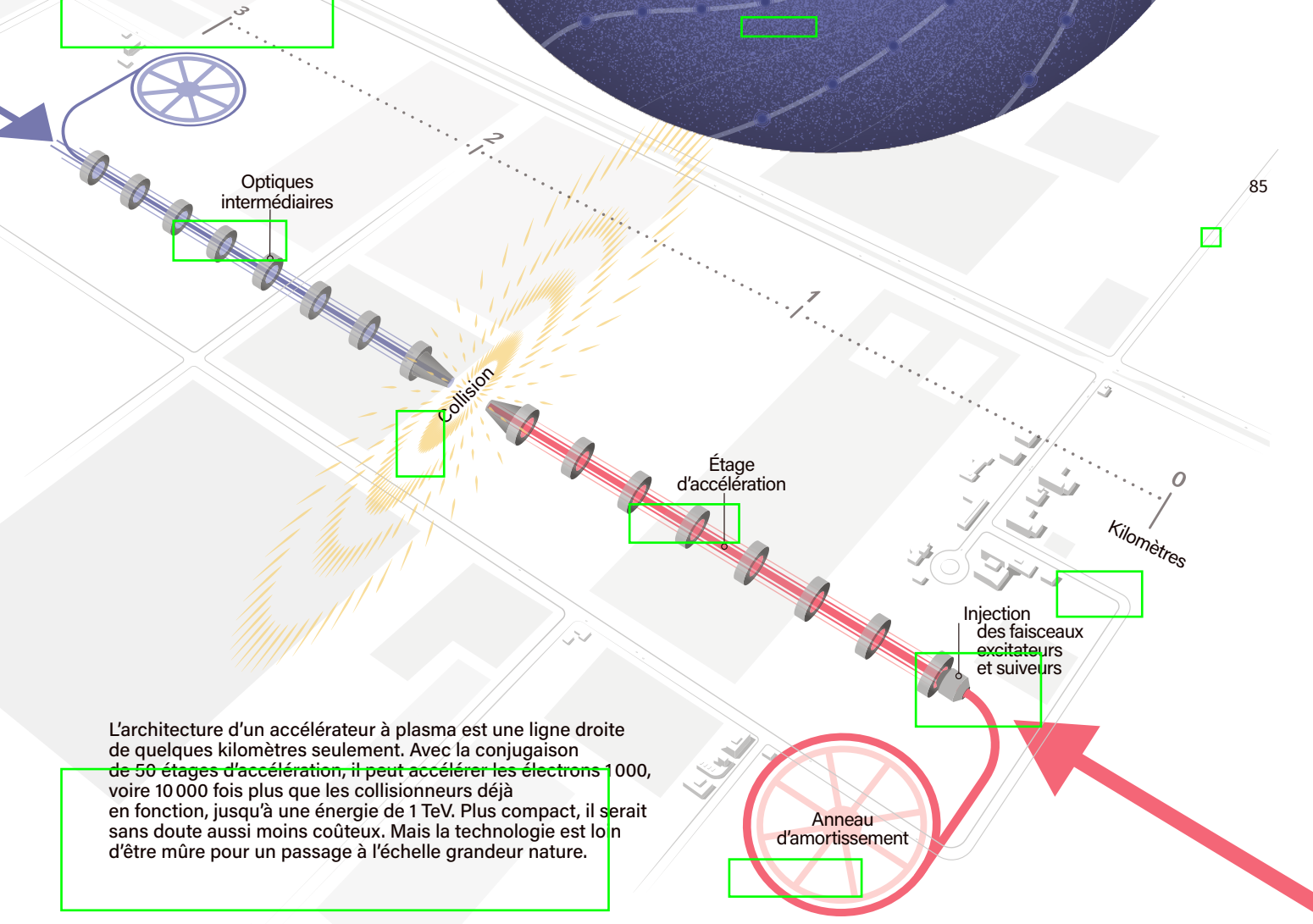
Héritier possible du LHC au Cern, l'Accélérateur linéaire international (International Linear Collider, ou ILC) entrechoquera des électrons avec des positrons. Pour éviter les courbes qui font perdre de l'énergie aux particules chargées, il sera de conception linéaire. Selon certaines estimations, son coût pourrait être le double de celui du LHC.

© Nick Bockelman

L'accélérateur à plasma avec faisceau d'électrons

À l'intérieur d'un plasma, un premier faisceau d'électrons excitateur repousse les électrons environnants. Une bulle ionique, concentrant des ions chargés positivement, se forme dans le sillage ; elle attire vers l'arrière les électrons chargés négativement. Emportés par leur vitesse, ces électrons vont trop loin, et sont réattirés par la bulle. Un champ électrique oscillant apparaît dans le sillage. Il est en capacité d'accélérer un second faisceau « suiveur » synchronisé.





L'architecture d'un accélérateur à plasma est une ligne droite de quelques kilomètres seulement. Avec la conjugaison de 50 étages d'accélération, il peut accélérer les électrons 1 000, voire 10 000 fois plus que les collisionneurs déjà en fonction, jusqu'à une énergie de 1 TeV. Plus compact, il serait sans doute aussi moins coûteux. Mais la technologie est loin d'être mûre pour un passage à l'échelle grandeur nature.

L'avenir des accélérateurs à plasma est incertain, mais d'ici à une décennie, construire une machine de 10 GeV semble possible

manière que le circuit intégré a miniaturisé l'électronique à partir des années 1960. Détaillons un peu le concept.

Les trois premiers états de la matière sont bien connus : solide, liquide et gazeux. Le plasma est souvent nommé le « quatrième état ». Bien que relativement rare dans notre quotidien, c'est le plus commun dans l'Univers. Selon certaines estimations, plus de 99 % de toute la matière visible dans le cosmos est à l'état plasmique – les étoiles, par exemple, en sont constituées. Fondamentalement, un plasma est un gaz ionisé avec une densité égale d'électrons et d'ions. Les scientifiques forment aisément des plasmas en laboratoire, en diffusant de l'électricité à travers un gaz comme dans un tube fluorescent ordinaire.

Employons une analogie nautique. Lorsqu'un bateau avance, il déplace de l'eau qui s'écarte à l'arrière du vaisseau pour former un sillage. De manière similaire, dans un accélérateur à plasma, une impulsion laser très concentrée et ultra-intense, se déplaçant à travers un plasma à la vitesse de la lumière, peut créer un champ de sillage relativiste, c'est-à-dire qui se propage lui aussi presque à la vitesse de la lumière, en exerçant une pression de radiation et en déplaçant les électrons du plasma sur sa trajectoire. Si, au lieu d'une impulsion laser, un paquet d'électrons excitateur à haute énergie est envoyé à travers le plasma, la charge négative de ces particules peut repousser tous les autres électrons du plasma *(voir l'illustration page précédente)*. Les ions les plus lourds, chargés positivement, demeureront immobiles. Après le passage de l'impulsion, les électrons éjectés, chargés négativement, sont réattirés vers les ions positifs. Les électrons se déplacent si vite qu'ils dépassent les ions et subissent encore une fois une attraction vers l'arrière, ce qui fait osciller le sillage. En raison de la séparation des électrons et des ions du plasma, un champ électrique se forme à l'intérieur de ce sillage.

Si un deuxième paquet d'électrons « suiveur » est placé derrière la première impulsion excitatrice, ses électrons peuvent acquérir de l'énergie dans le champ de sillage de la même façon qu'un paquet d'électrons est accéléré par les ondes radio dans un accélérateur classique. Une quantité suffisante d'électrons suiveurs absorberaient même assez d'énergie pour que le champ électrique s'en retrouve amorti. Dès lors, tous les électrons du paquet suiveur profiteraient d'un champ accélérateur constant et obtiendraient le même gain d'énergie, ce qui réduirait la dispersion d'énergie du faisceau.

L'AVENIR DU PLASMA

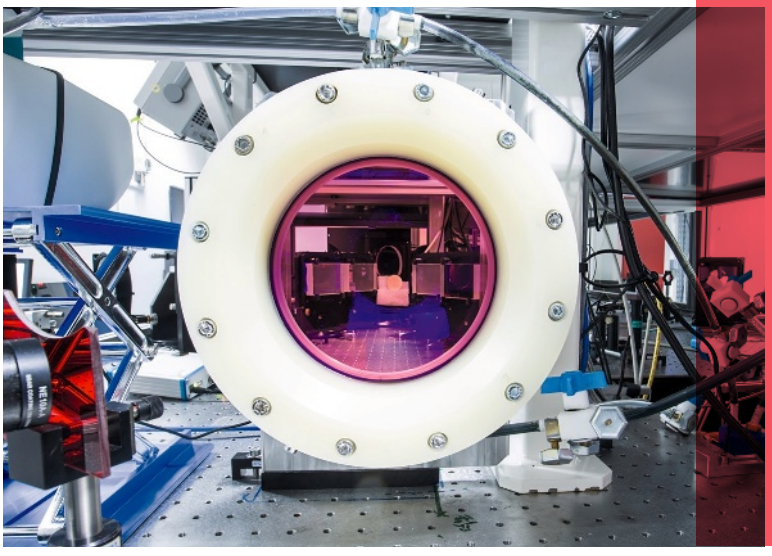
L'avantage principal d'un accélérateur à plasma par rapport à d'autres procédés, c'est que les champs électriques dans le sillage peuvent aisément être 1 000 fois plus forts que ceux des cavités à radiofréquence traditionnelles. De plus, une fraction très significative de l'énergie que le faisceau excitateur transfère au sillage peut être extraite par le paquet suiveur. Ces effets font potentiellement du collisionneur à plasma un appareil à la fois plus compact et moins coûteux que les collisionneurs traditionnels.

Les accélérateurs à plasma, qu'ils soient à base de laser ou de faisceaux d'électrons, ont tous deux énormément progressé ces deux dernières décennies. Ma propre équipe, à

l'université de Californie, à Los Angeles, a réalisé des expériences pilotes avec des physiciens du Laboratoire national de l'accélérateur SLAC, sur leur site de Menlo Park, en Californie. Nous avons injecté des électrons excitateurs et suiveurs avec une énergie initiale de 20 GeV et avons trouvé que les électrons suiveurs gagnaient en énergie jusqu'à 9 GeV après avoir traversé un plasma de 1,3 mètre de longueur. Nous avons aussi obtenu un gain de 4 GeV pour un paquet de positrons en n'utilisant qu'un plasma de 1 mètre dans une expérience de validation de concept. Plusieurs autres laboratoires dans le monde ont aussi utilisé des champs de sillage créés par laser pour produire des gains d'énergie dans des paquets d'électrons à hauteur de plusieurs GeV.

L'objectif final des spécialistes de l'accélération à plasma est de créer un accélérateur linéaire qui provoque la collision de faisceaux très intenses d'électrons et de positrons, ou seulement d'électrons, avec une énergie totale excédant 1 TeV. Pour accomplir cet exploit, nous aurions besoin de connecter environ 50 étages d'accélération à plasma en série, chaque étage fournissant une énergie de 10 GeV.

Mais l'alignement et la synchronisation des faisceaux excitateurs et suiveurs à travers tant



© J. Barande/École polytechnique

← Un programme de recherche sur l'accélérateur à plasma du futur financé par l'Union européenne à hauteur de 3 millions d'euros a mobilisé 41 instituts de recherche (dont le CEA, le synchrotron Soleil et le CNRS, avec son puissant laser Apollon, *en photo*) entre 2015 et 2019. Son nom : Eupraxia, pour European Plasma Research Accelerator with Excellence in Applications. Un démonstrateur européen pourrait ainsi voir le jour dans la prochaine décennie, mais à des énergies très insuffisantes pour les besoins de la physique des particules.

d'étages d'accélération à plasma pour obtenir une collision avec la précision désirée est un défi énorme. Le rayon typique du sillage est inférieur à 1 millimètre, et les scientifiques doivent injecter le paquet d'électrons suiveurs avec une précision submicronique. Ils doivent aussi synchroniser l'impulsion excitatrice et le faisceau suiveur avec moins de 1 centième de billionième de seconde de décalage. Toute erreur d'alignement conduirait à une baisse de la qualité du faisceau et une perte en énergie et en charge causée par l'oscillation des électrons autour de l'axe du sillage de plasma. Cette perte se traduit par une émission de rayons X durs, connue sous le nom d'« émission bêtatron », et place une limite finie à la quantité d'énergie que l'on peut obtenir grâce à un accélérateur à plasma.

BEAUCOUP DE PERTES D'ÉNERGIE EN PRÉVISION

D'autres difficultés techniques freinent la concrétisation. Par exemple, le premier atout d'un collisionneur de particules est sa luminosité – une mesure de la quantité de particules passant à travers un espace donné en un temps donné. La luminosité multipliée par la section efficace – ou par la probabilité que deux particules se percutent – indique combien de collisions d'une nature particulière par seconde vous pourrez probablement observer à un niveau d'énergie donné. La luminosité voulue pour un collisionneur linéaire électron-positron à 1 TeV est de 10^{34} $cm^{-2}s^{-1}$. L'atteindre nécessiterait que les faisceaux qui se percutent aient une puissance moyenne de 20 mégawatts chacun – 10^{10} particules par paquet à un taux de répétition de 10 kilohertz et une taille de faisceau au point de collision de 1 dixième de milliardième de mètre. Pour illustrer le défi que cela représente, concentrons-nous sur le besoin de puissance moyen. Même si vous pouviez transférer de l'énergie du faisceau excitateur au faisceau accéléré avec 50 % d'efficacité, 20 mégawatts de puissance seraient perdus dans les deux fines colonnes de plasma. Idéalement, nous pourrions en récupérer une partie, mais c'est loin d'être simple.

Les scientifiques ont accompli d'importants progrès sur les technologies nécessaires à la partie électrons d'un collisionneur linéaire à plasma, mais l'accélération des positrons n'en est, elle, qu'à ses balbutiements. Une décennie de recherches fondamentales et concertées sera nécessaire pour amener les positrons au même point que celui que nous avons atteints avec les électrons. Une option alternative consisterait à faire collisionner des électrons avec des électrons ou même avec des protons, dans une machine où l'un des deux accélérateurs d'électrons, voire les deux, serait fondé sur un accélérateur à plasma. Un autre concept exploré au Cern est la modulation d'un paquet de protons de plusieurs centimètres de longueur en l'envoyant à travers une colonne de plasma et en utilisant le champ de sillage qui l'accompagne pour accélérer un paquet d'électrons.

L'avenir des accélérateurs à plasma est incertain, mais passionnant. Il semble possible que, d'ici à une décennie, nous puissions construire des accélérateurs à plasma de 10 GeV tenant sur une grande table pour diverses applications commerciales et scientifiques en utilisant les lasers ou les accélérateurs d'électrons existants. Mais nous serions encore loin de mettre au point un collisionneur linéaire à plasma permettant des découvertes d'une nouvelle physique. Pourtant, même avec la perspective du ILC et du FCC, nous pensons utile de persister dans le perfectionnement d'une technologie exotique qui conduirait à des économies en taille et en dépenses. À ce titre, la technologie du plasma offre aux chercheurs une occasion formidable de prendre des risques, d'être créatifs, de résoudre des problèmes fascinants et un jour, qui sait, de découvrir de nouveaux éléments fondamentaux de la nature !

— L'auteur —

> Chandrashekhar Joshi est professeur de génie électrique à l'université de Californie, à Los Angeles (UCLA), où il dirige le groupe Laser-Plasma.

— À lire —

> W. Wang *et al.*, Free-electron lasing at 27 nanometres based on a laser wakefield accelerator, *Nature*, vol. 595, pp. 516-520, 2021.

> A. Cho, This is the first mini-particle accelerator to power a laser, *Science*, 2021. https://bit.ly/3dzocp5

> Site du consortium Eupraxia : www.eupraxia-project.eu

> R. Bingham *et al.*, Introduction to plasma accelerators: The basics, Proceedings of the CAS-CERN Accelerator School: Plasma Wake Acceleration, *Cern*, 2016.

ABONNEZ-VOUS À Pour la Science

OFFRE D'ABONNEMENT 1 AN

2 FORMULES AU CHOIX

	FORMULE PAPIER + HORS-SÉRIE	FORMULE INTÉGRALE
Le magazine papier 12 numéros par an	✓	✓
Le magazine en version numérique 12 numéros par an		✓
Le hors-série papier 4 numéros par an	✓	✓
Le hors-série en version numérique 4 numéros par an		✓
Accès à pourlascience.fr actus, dossiers, archives depuis 1996		✓
VOTRE TARIF D'ABONNEMENT	**79 €** Au lieu de ~~114,40 €~~	**99 €** Au lieu de ~~174,40 €~~
	31 % de réduction *	**43 %** de réduction *

BULLETIN D'ABONNEMENT

À renvoyer accompagné de votre règlement à :

Service Abonnement Groupe Pour la Science – 235 avenue Le Jour se Lève– 92100 Boulogne Billancourt – email : serviceclients@groupepourlascience.fr

PAG22STDDOS

OUI, je m'abonne pour 1 an à Pour la Science

1 / Je choisis ma formule (merci de cocher)

☐ FORMULE **PAPIER + HORS SÉRIE** — **79€** Au lieu de ~~114,40€~~
- 12 n° du magazine papier
- 4 Hors-série papier

☐ FORMULE **INTÉGRALE** — **99€** Au lieu de ~~174,40€~~
- 12 n° du magazine (papier et numérique)
- 4 Hors-série (papier et numérique)
- Accès illimité aux contenus en ligne

TF_INT_N°12N_99€

2 / J'indique mes coordonnées

☐ M. ☐ Mme

Nom : ..... Prénom : .....

Adresse : .....

.....

Code postal ..... Ville : .....

Téléphone .....

Courriel : (indispensable pour la formule intégrale)

..... @ .....

J'accepte de recevoir les offres de Pour la Science ☐ OUI ☐ NON

3 / Je choisis mon mode de règlement

☐ **Par chèque** à l'ordre de *Pour la Science* en nous retournant ce bulletin d'abonnement complété.

Pour un paiement par carte bancaire, rendez-vous sur boutique.groupepourlascience.fr

* Réduction par rapport au prix de vente en kiosque et l'accès aux archives numériques. Durée d'abonnement : 1 an. Délai de livraison : dans le mois suivant l'enregistrement de votre règlement. Offre valable jusqu'au 31/03/2023 en France métropolitaine uniquement. Pour un abonnement à l'étranger, merci de consulter notre site boutique.groupepourlascience.fr. Photos non contractuelles. Vous pouvez acheter séparément les numéros de *Pour la Science* pour 6,90 € et les hors-séries pour 7,90 €. En souscrivant à cette offre, vous acceptez nos conditions générales de vente disponibles à l'adresse suivante : https://rebrand.ly/CGV-PLS.

Les informations que nous collectons dans ce bulletin d'abonnement nous aident à personnaliser et à améliorer les services que nous vous proposons. Nous les utiliserons pour gérer votre accès à l'intégralité de nos services, traiter vos commandes et paiements, et vous faire part notamment par newsletters de nos offres commerciales moyennant le respect de vos choix en la matière. Le responsable du traitement est la société *Pour la Science*. Vos données personnelles ne seront pas conservées au-delà de la durée nécessaire à la finalité de leur traitement. *Pour la Science* ne commercialise ni ne loue vos données à caractère personnel à des tiers. Les données collectées sont exclusivement destinées à *Pour la Science*. Nous vous invitons à prendre connaissance de notre charte de protection des données personnelles à l'adresse suivante : https://rebrand.ly/charte-donnees-pls. Conformément à la réglementation applicable (et notamment au Règlement 2016/679/UE dit « RGPD ») vous disposez des droits d'accès, de rectification, d'opposition, d'effacement, à la portabilité et à la limitation de vos données personnelles. Pour exercer ces droits (ou nous poser toute question concernant le traitement de vos données personnelles), vous pouvez nous contacter par courriel à l'adresse protection-donnees@pourlascience.fr.

Groupe Pour la Science - Siège social : 170 bis, boulevard du Montparnasse, CS20012, 75680 Paris CEDEX 14 - Sarl au capital de 32 000€ - RCS Paris B 311 797 393 - Siret : 311 797 393 000 23 - APE 58.14 Z

Le côté obscur de l'Univers

Elles sont deux, leurs noms se ressemblent au point qu'on a tendance à les confondre : matière noire et énergie sombre. L'une et l'autre se refusent à toute observation directe. À elles deux, elles composent 95 % du contenu de l'Univers et pourtant ne figurent nulle part dans le modèle standard. En somme, elles défient les physiciens. Ça tombe bien, ils adorent ça. Leurs théories pour lever ces mystères ont pour nom « matière noire cannibale » ou « champs caméléons » : autant dire que, plus que jamais, l'imagination conjuguée à la rigueur fera les Prix Nobel de physique de demain.

© Sébastien Thibault/Pour la science

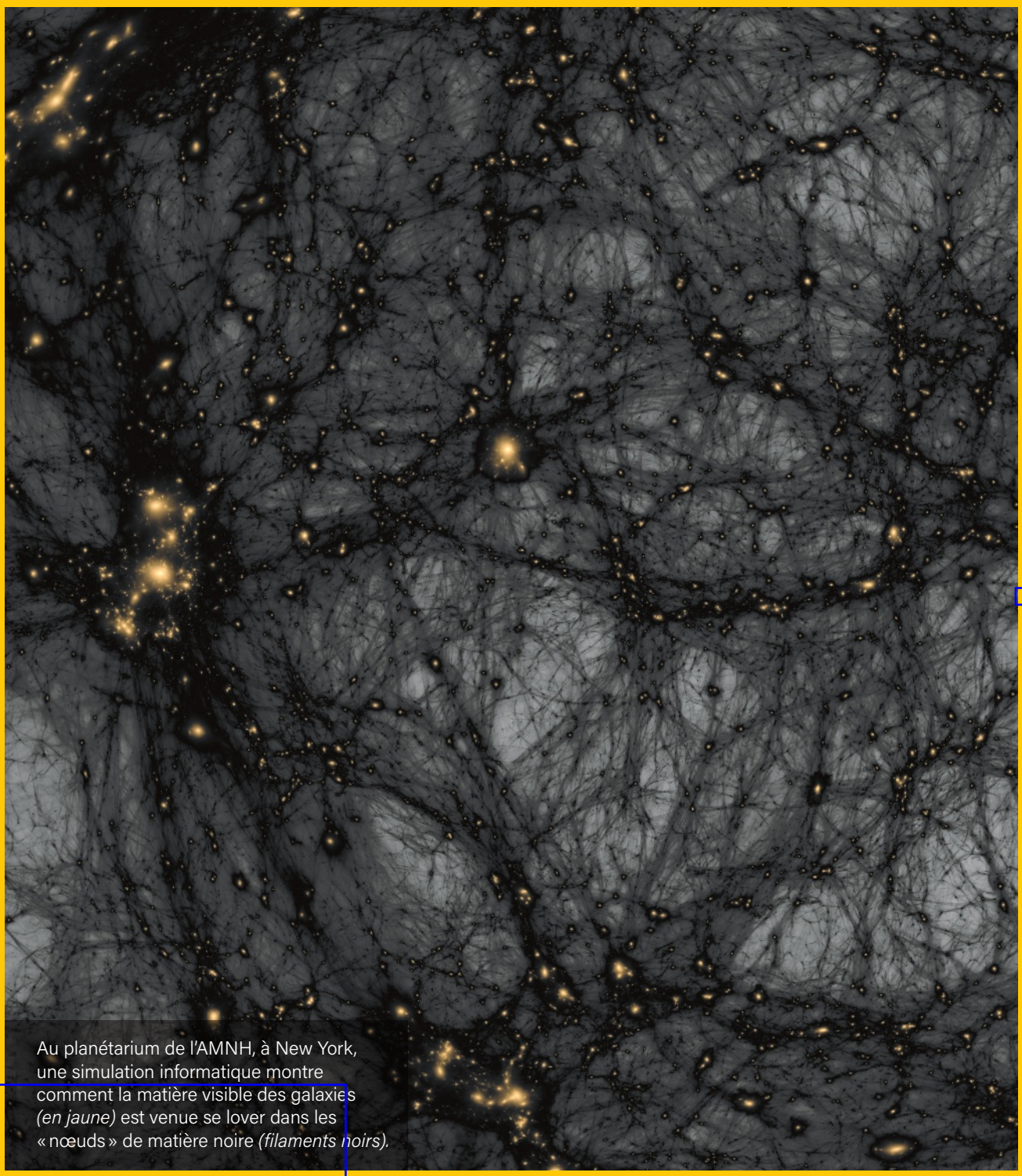
03

La matière telle qu'on la connaît n'est qu'une infime partie de l'Univers. Bien plus abondante est la matière noire, qui pourtant échappe à toute détection. Plutôt que noire, elle est surtout invisible, mais une chose est sûre : elle existe. La preuve par cinq.

L'insaisissable matière noire

Pauline Gagnon

© AMNH



Au planétarium de l'AMNH, à New York, une simulation informatique montre comment la matière visible des galaxies *(en jaune)* est venue se lover dans les « nœuds » de matière noire *(filaments noirs).*

En bref

> La matière noire représente 27% du contenu de l'Univers, contre 5% seulement de matière visible.

> Son existence a été la première fois déduite de l'étude de la vitesse des étoiles dans les galaxies spirales.

> Depuis, elle a été confirmée par bien d'autres méthodes : lentilles gravitationnelles, fond diffus cosmologique, simulations…

> Indispensable pour expliquer l'histoire et la structure de l'Univers, cette matière noire n'en continue pas moins d'échapper à toute détection directe.

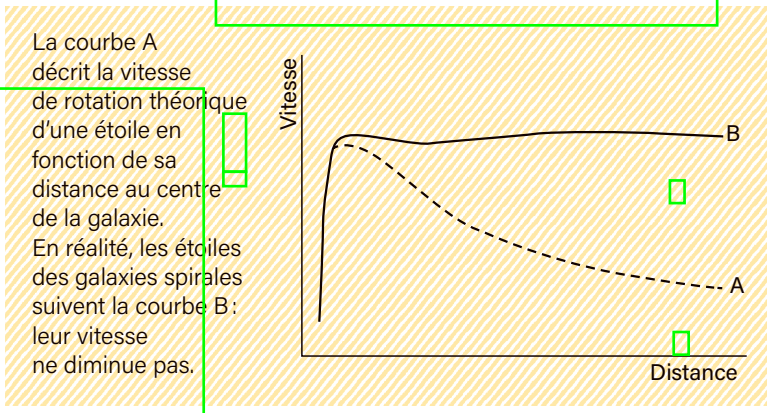
Avec la découverte du boson de Higgs, on a pu croire détenir enfin un tableau complet du monde matériel qui nous entoure. Erreur. La matière visible, vous, moi, et tout ce que nous voyons sur Terre, dans les étoiles et les galaxies, en un mot celle décrite par le modèle standard, ne représente que 5% de ce qui existe dans l'Univers. Et le reste ? Quelque 68% correspondent à une énigmatique énergie sombre et 27% à une mystérieuse matière dite «noire», qui nous occupera ici. La situation est paradoxale, car bien que sa nature nous échappe encore complètement *(voir Beaucoup d'appelés, pas encore d'élu, par M. Cirelli, page 102)*, nombre d'observations attestent sa réalité.

Le premier indice de l'existence de la matière noire est venu des travaux de l'astronome suisse Fritz Zwicky dès 1933. Il souhaitait mesurer la masse d'un amas galactique, un groupe de plus de cent galaxies liées par les forces gravitationnelles, en utilisant deux méthodes. Il a commencé par estimer la masse à partir de la vitesse de rotation des galaxies au sein de l'amas. De la même manière que des enfants jouant sur un manège doivent se tenir pour ne pas être éjectés, les galaxies d'un amas galactique en rotation ont besoin d'une force pour rester liées. Dans ce cas particulier, cette force est apportée par l'interaction gravitationnelle, par le biais de la matière contenue dans l'amas galactique. Afin de maintenir la cohésion, il doit y avoir suffisamment de matière pour engendrer la force gravitationnelle adéquate ; sans elle, les galaxies s'éparpilleraient.

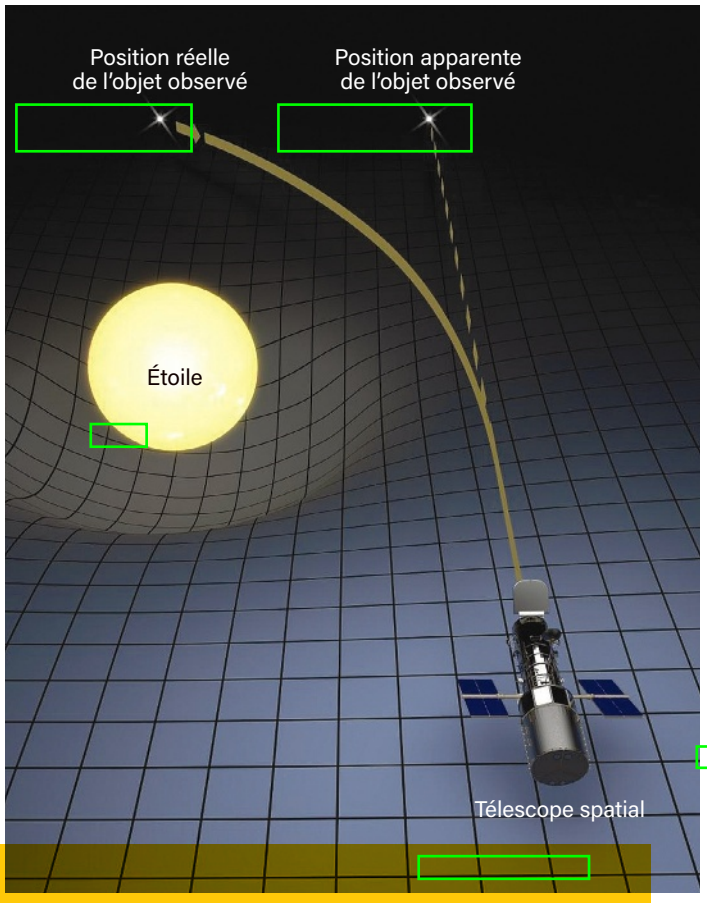
Zwicky a alors vérifié ses calculs par une seconde méthode, cette fois en évaluant la masse totale de l'amas galactique à partir de la lumière émise par ses galaxies, la quantité de rayonnement dépendant du contenu. De la sorte, on obtient une estimation grossière de la quantité de matière contenue dans un amas galactique. Problème : les deux masses obtenues étaient complètement différentes. La quantité de matière visible était très insuffisante pour produire la force gravitationnelle nécessaire au maintien de la cohésion de l'amas galactique. L'astronome en a donc déduit qu'un nouveau type de matière inconnu devait créer un champ gravitationnel sans émettre de lumière, d'où le terme de matière noire (de l'allemand *dunkle Materie*).

GALAXIES EN ROTATION

Malheureusement, les calculs de Zwicky manquaient de précision. Cet obstacle a été levé dans les années 1970 par Vera Rubin lorsqu'elle s'est intéressée aux vitesses de



La courbe A décrit la vitesse de rotation théorique d'une étoile en fonction de sa distance au centre de la galaxie. En réalité, les étoiles des galaxies spirales suivent la courbe B : leur vitesse ne diminue pas.



Par son champ gravitationnel, un corps massif *(ici, une étoile)* déforme la trame de l'espace comme une boule de billard déformerait un drap tendu. Tous les corps passant à proximité suivront la courbure de l'espace déformé. La lumière ne fera pas exception et verra sa trajectoire s'incurver avant d'être captée par un télescope.

rotation des étoiles au sein d'une galaxie spirale. Comme l'indique la courbe A sur le schéma page précédente, l'astronome américaine a observé que les étoiles se déplaçaient toutes à peu près à la même vitesse, quelle que soit leur distance au centre de la galaxie. Or, d'après les lois de Kepler, plus l'étoile est éloignée de son centre galactique, et plus elle devrait tourner lentement autour (c'est ce qu'indique la courbe B). En somme, c'est comme si les étoiles les plus lointaines étaient en rotation autour de galaxies dix fois plus massives qu'observé. D'après l'astronome, ce phénomène n'était possible que si les galaxies étaient emplies d'énormes quantités de matière invisible, s'étendant même au-delà des objets galactiques visibles les plus distants. Vera Rubin fut donc la première à prouver de manière plus quantitative l'existence de matière noire, et ce avec une précision suffisante pour convaincre la communauté scientifique. Depuis, les preuves se sont accumulées.

LENTILLES GRAVITATIONNELLES

Aujourd'hui, sa présence peut être mesurée de façon plus directe grâce aux lentilles gravitationnelles, une des techniques les plus impressionnantes pour la détection de la matière noire. Le principe repose sur le fait que de grandes quantités de matière (visible ou noire) engendrent de forts champs gravitationnels. À leur tour, ces champs déforment l'espace qui les entoure et modifient la trajectoire de la lumière.

Imaginez que deux personnes tendent horizontalement un drap, et qu'une autre lance dessus une balle de ping-pong. La balle se déplacera en ligne droite, suivant la surface du drap. Supposez maintenant que quelqu'un laisse tomber un objet lourd, comme une boule de billard, au milieu du drap. Celui-ci est alors creusé par une dépression. La balle de ping-pong décrira de fait une courbe en suivant la surface déformée du drap. La lumière se comporte un peu comme la balle de ping-pong. Elle suit la courbure de l'espace dans lequel elle se propage.

© Image courtesy of David Jarvis

Il arrive que deux amas galactiques entrent en collision. On peut faire l'analogie avec un match de rugby.

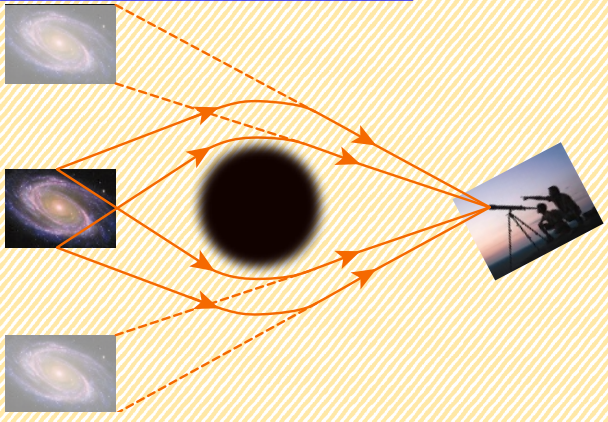
L'espace vide ne contenant aucune matière est semblable au drap tendu. La lumière s'y propage en ligne droite. Mais les objets massifs, comme les étoiles, les galaxies ou les énormes surdensités de matière noire, engendrent tous un fort champ gravitationnel. L'espace qui les entoure est déformé, et la lumière suit la courbure de cet espace déformé. Ce phénomène se produit quand de la lumière passe à proximité du Soleil : elle est légèrement déviée. Une personne qui observe de la lumière provenant d'une étoile située derrière le Soleil aura l'impression que cette lumière émane d'un autre point, légèrement décalé *(voir la figure page précédente)*.

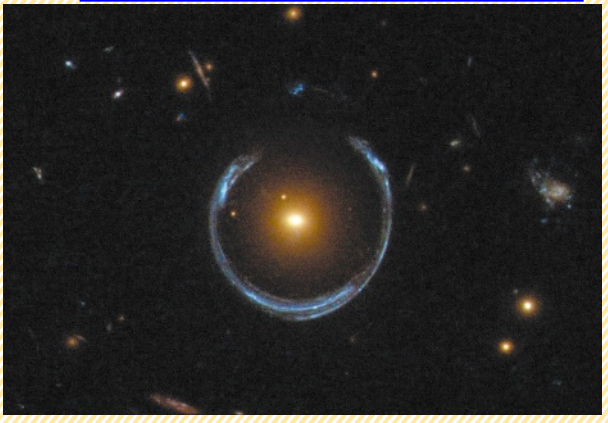
Une accumulation de matière noire agit à la manière d'une lentille. Ainsi, une partie de la lumière provenant d'une galaxie située derrière une surdensité de matière noire se courbe en passant à côté. La lumière va alors former un anneau tel que celui saisi par le télescope spatial *Hubble (voir la figure ci-dessous)*. Quand la galaxie et le télescope ne sont pas parfaitement alignés avec la lentille, on ne voit que de petits arcs. Ces images révèlent qu'une quantité importante de matière se trouve entre les observateurs et la galaxie scrutée. Cette technique est suffisamment puissante pour déterminer la distribution de matière noire dans l'Univers.

COMME DES FANTÔMES

Une autre preuve se récolte au voisinage des galaxies, où la matière noire se concentre. Une galaxie est un amas d'étoiles (la nôtre s'appelle la Voie lactée), et un groupement de plus de cent galaxies est un amas galactique. Il arrive parfois que deux amas galactiques entrent en collision.

On peut faire l'analogie avec un match de rugby. Il faut imaginer que le choc concerne des joueurs normaux, mais aussi des fantômes. Les premiers symbolisent la matière visible de l'amas galactique, tandis que les seconds représentent la matière noire.





Les rayons lumineux émis par une galaxie sont courbés dans les trois dimensions *(à gauche, seulement deux sont représentées)* après être passés à proximité d'une accumulation de matière noire. Pour un observateur, la galaxie semblera située au-dessus ou au-dessous de sa position réelle. Vu par le télescope *Hubble*, cet effet de lentille gravitationnelle en trois dimensions produit une image de la galaxie en forme d'anneau autour de sa position réelle *(à droite)*.

© Galaxy image courtesy of NASA/JPL-Caltech/ESA/Harvard-Smithsonian CfA et © Image courtesy of NASA

L'amas de la Balle résulte de la collision entre deux amas de galaxies. La coloration en rose met en évidence le choc entre particules de matière ordinaire ; chauffées, elles émettent des rayons X détectables. Les zones en violet représentent la matière noire, dont la présence a été constatée grâce aux lentilles gravitationnelles. Zéro émission de rayons X : la matière noire est passée comme un fantôme.

Les joueurs normaux se percutent et sont considérablement ralentis. La friction provoque un échauffement général. Mais les fantômes traversent le pack adverse sans être ralentis le moins du monde.

Dans l'« amas de la Balle », le télescope spatial *Hubble* a capturé une image d'une telle collision entre deux amas *(voir la photo ci-dessus)*. La zone en rose à gauche représente la matière visible de l'amas galactique qui va vers la gauche, en d'autres termes l'amas qui vient de la droite. La zone rose à droite montre l'autre amas galactique, qui est arrivé par la gauche et se déplace vers la droite. Sous l'effet de la friction, toute cette matière a été chauffée pendant la collision et a engendré de grandes quantités de rayons X : ce sont ces derniers qui sont représentés en rose. Les zones en violet représentent la matière noire, dont la présence a été détectée grâce aux lentilles gravitationnelles. La coloration violette a ainsi été ajoutée à l'image, alors que les zones en rose correspondent à de la matière ordinaire qui émet des rayons X. Le décalage entre la matière noire *(en violet)* et la matière visible *(en rose)* apparaît clairement.

L'UNIVERS DEVIENT TRANSPARENT

De leur côté, les astrophysiciens de la collaboration *Planck* ont déterminé la quantité de matière de l'Univers au moyen d'une autre méthode : en étudiant le fond cosmologique diffus. Avant de résumer ces travaux, remontons aux premiers temps de l'Univers, à savoir le Big Bang, une explosion massive qui s'est produite il y a 13,8 milliards d'années *(voir l'encadré page 98)*.

L'énergie libérée par le Big Bang est d'abord apparue sous forme de rayonnement. Les particules ont commencé à apparaître une fois l'Univers suffisamment refroidi par son expansion. C'est seulement 380 000 ans plus tard, une fois la température descendue jusqu'à (seulement) 6 000 °C environ, que les atomes ont commencé à se former, car au-dessus de cette température, ils se brisent. Ce fut un moment critique : l'Univers connut une transition majeure, passant d'une soupe très énergétique de particules chargées à un espace constitué d'atomes neutres, permettant enfin la libre propagation d'ondes électromagnétiques telles que la lumière. À partir de là, l'Univers est devenu transparent, traversé par la lumière. Et celle-ci est toujours présente.

Comment est-ce possible ? Il faut comprendre que l'Univers était à l'époque, et est toujours, un immense espace essentiellement vide. Sur Terre, ou sur n'importe quelle étoile, la densité y est bien plus grande, mais les distances entre les astres sont tellement grandes que la densité moyenne de l'Univers ne dépasse pas… 5 protons par mètre cube ! Par comparaison, 1 mètre cube d'eau contient 6×10^{29} protons et neutrons, ces deux particules ayant plus ou moins la même masse. Il n'y a donc rien d'étonnant à ce que presque toute la lumière présente

© image courtesy of NASA

380 000 ans après le Big Bang soit encore en train de voyager dans l'Univers aujourd'hui, faute d'obstacles sur son passage.

Ce rayonnement fossile, ou fond diffus cosmologique, date de cette époque, quand l'Univers n'avait que 380 000 années d'existence. Chez les humains, ce serait l'équivalent de l'âge d'un jour pour une personne centenaire. Un bébé Univers ! Cette lumière fossile se propage depuis lors, et nous atteint de toutes les directions.

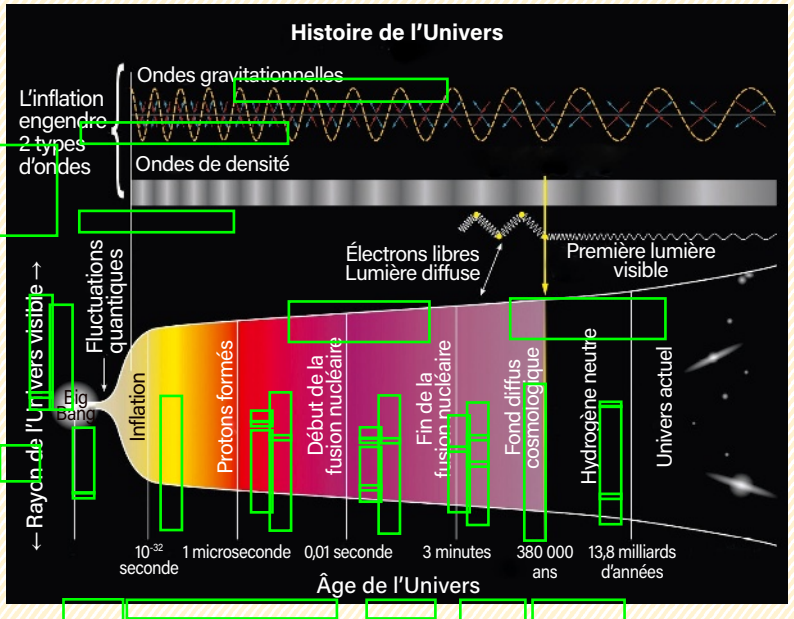
DES GRUMEAUX… EN COULEUR

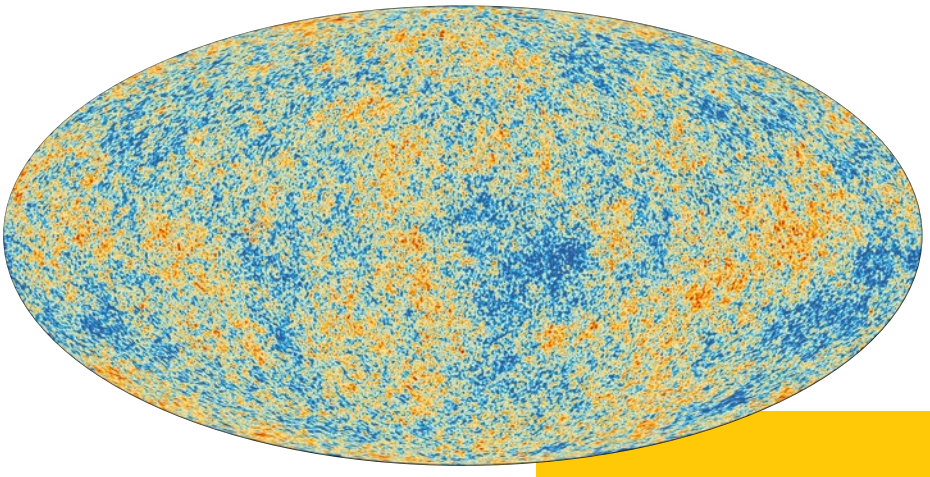
Pour les ondes électromagnétiques telles que la lumière, il y a une correspondance entre la température et le rayonnement qu'un corps émet quand il est chauffé. La lumière rayonnée lorsque l'Univers faisait 6 000 °C correspond à la lumière visible, comme celle produite par un morceau de métal chauffé jusqu'à ce qu'il commence à rougeoyer. Pendant l'expansion, l'énergie de l'Univers a été distribuée sur un plus gros volume. Il s'est donc refroidi, comme l'eau chaude d'un verre que l'on verserait dans un volume beaucoup plus grand d'eau froide. Les gouttes d'eau chaude cèdent une part de leur énergie à l'ensemble du liquide, qui au final atteint une température bien inférieure à celle de l'eau chaude initiale.

La température de l'Univers aujourd'hui ne dépasse pas – 270,425 °C, ou, sur l'échelle absolue, 2,725 kelvins. Cela correspond au domaine des microondes. Ainsi, la lumière visible de l'Univers nouveau-né perdure, sous une forme imperceptible à l'œil, mais pas aux capteurs du satellite *Planck* qui ont livré la plus « vieille » image que nous ayons de l'Univers *(voir la figure page ci-contre)*. Elle nous montre à quoi il ressemblait dans son jeune âge et nous apporte des informations importantes sur la manière dont les particules ont réussi à rester groupées dans

Les débuts de l'Univers

Un instant après le Big Bang, la température de l'Univers a atteint le niveau invraisemblable de 10^{27} degrés (avouons-le, peu importe qu'ils soient celsius ou kelvin) ne laissant de place pour exister qu'à du rayonnement. Après une phase d'expansion ultrarapide, l'Univers a continué à se dilater, mais à un rythme bien plus lent. Toute l'énergie qu'il contient étant dispersée dans un volume toujours plus grand, il a fini par se refroidir doucement. Son contenu s'est peu à peu matérialisé sous forme de particules (les quarks et les gluons), d'abord trop pleines d'énergie pour se lier ; elles constituaient un plasma quark-gluon. Puis, environ 10^{-10} secondes après le Big Bang, la température fut assez basse pour que protons et neutrons puissent se former. À ce stade, l'essentiel de l'Univers restait encore sous forme de rayonnement ; les particules de matière apparaissaient et disparaissaient. Il fallut encore patienter 380 000 ans pour les premiers atomes, et un bon milliard d'années pour les grandes formations comme les galaxies et les amas.





Le satellite *Planck* a dévoilé en 2013 ce qui est la plus vieille image de l'Univers, tel qu'il était 380 000 ans après le Big Bang. Les différences de couleurs traduisent des différences de température. Les zones orangées sont les plus chaudes : la matière commence à s'y agglutiner.

© Image courtesy of Planck and the European Space Agency

les premiers moments. Bien que les variations soient très petites, l'Univers n'était déjà plus homogène, mais plein de «grumeaux». Les différentes couleurs montrent qu'il y avait des points plus chauds correspondant aux endroits où la matière avait déjà commencé à s'agglutiner sous l'influence de l'interaction gravitationnelle.

Nous pouvons analyser ce rayonnement cosmique comme si c'était un prisme décomposant la lumière en ses différentes couleurs, chacune ayant une longueur d'onde particulière, dotée d'une fréquence précise. Les cosmologues ont étudié la quantité de rayonnement associée à différentes fréquences, chacune correspondant à de petites variations de température, représentées par de petits points ou grumeaux de différentes couleurs sur la carte. La taille de chaque grumeau et sa température sont liées à l'évolution de l'Univers.

Les données extraites de la carte ont été comparées aux prédictions d'un modèle cosmologique théorique qui décrit comment la matière s'est formée et a évolué dans l'Univers depuis le Big Bang jusqu'à nos jours. Ce modèle a six paramètres ajustables, parmi lesquels la densité de la matière noire et celle de l'énigmatique «énergie sombre». Les scientifiques de *Planck* ont déterminé ces deux densités de façon à ajuster le modèle aux observations expérimentales. Résultat ? Comme nous l'avons écrit plus haut, l'Univers contient 27 % de matière noire et 68 % d'énergie sombre.

De cette énergie sombre, nous ne savons à peu près rien. En 1998, deux équipes indépendantes, l'une dirigée par Saul Perlmutter et l'autre par Adam Riess et Brian Schmidt, ont mesuré la vitesse à laquelle les galaxies s'éloignent les unes des autres. Toutes deux ont observé que non seulement l'Univers est en expansion, mais que cette expansion s'accélère. Cette découverte leur a valu le prix Nobel de physique en 2011. Or pour accélérer, que ce soit à bicyclette ou en voiture, il faut de l'énergie. D'où vient donc cette énergie phénoménale capable d'emballer l'Univers ? Nul ne le sait. Et la nature de cette énergie, dite «sombre» pour faire le parallèle avec la matière noire, est complètement inconnue.

SEMER DES GRAINES DE GALAXIES

La cosmologie a confirmé l'existence de matière noire non seulement en mettant en évidence un excellent accord entre les données expérimentales de *Planck* et les prédictions théoriques, mais encore en clarifiant son rôle essentiel dans la formation des galaxies. La vaste majorité des spécialistes pensent désormais que toute la matière, visible et invisible, était presque uniformément distribuée juste après le Big Bang, comme un immense brouillard. Nous l'avons dit, une phase d'expansion rapide s'est produite immédiatement après le Big Bang, permettant à l'Univers de se refroidir suffisamment pour que trois minutes plus tard les particules commencent à former des noyaux atomiques. Les premiers atomes électriquement neutres sont apparus 380 000 ans plus tard et

Comment passe-t-on d'un Univers brumeux à un Univers grumeleux ? Probablement à cause de la matière noire, plus lourde que la matière ordinaire.

les galaxies se sont formées entre 100 millions et 1 milliard d'années après.

Comment l'immense nuage de matière uniformément distribuée de l'Univers primordial s'est-il transformé en de grandes structures comme les galaxies ? Comment les atomes ont-ils fusionné pour permettre ce passage d'un Univers brumeux à un Univers grumeleux ? Sans doute à cause de la matière noire. Puisqu'elle est probablement plus lourde que la matière ordinaire, elle aurait ralenti plus tôt. De petites fluctuations microscopiques ont progressivement évolué en minuscules surdensités de matière noire qui ont grossi en accrétant davantage de matière noire (attirée par la force gravitationnelle) et ont continué à croître par effet boule de neige. Parce que la matière noire semble normalement soumise à l'interaction gravitationnelle, mais très peu, voire pas du tout, aux trois autres interactions (forte, faible et électromagnétique), ces petites accumulations de matière noire ont mieux résisté aux tempêtes de rayonnement électromagnétique qui sévissaient aux débuts de l'Univers. En revanche, la matière ordinaire a dû avoir beaucoup plus de mal à s'agglutiner dans cet environnement hostile.

Une fois la matière visible refroidie suite à l'expansion de l'Univers, elle aussi a commencé à s'accumuler autour des surdensités de matière noire déjà formées. C'est ainsi que la matière noire aurait semé les graines des galaxies. « Tout cela aurait été possible sans la matière noire, mais aurait pris beaucoup plus de temps », affirme Alexandre Arbey, cosmologiste au Cern.

Afin de tester ces hypothèses, les spécialistes ont recours aux simulations. Un modèle d'évolution est validé si, en partant de l'image que nous avons de l'Univers 380 000 ans après sa naissance, et après avoir simulé comment il évoluerait sur 13,8 milliards d'années, il livre quelque chose qui ressemble à ce que nous observons aujourd'hui. De tels modèles existent, et ils montrent l'histoire de l'Univers en accéléré grâce à l'énorme puissance de calcul des ordinateurs d'aujourd'hui. Ainsi, 13,8 milliards d'années d'évolution de l'Univers se retrouvent condensées, faisant apparaître la formation des grandes structures en quelques secondes. Et les modèles théoriques qui n'incluent pas la présence de matière noire ne reproduisent pas ces grandes structures : s'il en fallait, voilà un argument de plus en faveur de son existence. Reste à savoir en quoi elle consiste…

— L'autrice —

> Pauline Gagnon a été physicienne au Cern et à l'université d'Indiana.

Cet article est la traduction de « The dark side of the universe », paru dans *American Scientist* (mai-juin 2017).

— À lire —

> Anne M. Green, Dark matter in astrophysics/cosmology, https://arxiv.org/abs/2109.05854, 2021.

> G. Bertone *et al.*, A new era in the search for dark matter, *Nature*, vol. 562, pp. 51-56, 2018.

> P. Gagnon, Who cares about particle physics ? Making sense of the Higgs Boson, the Large Hadron Collider and CERN, *Oxford University Press*, 2016.

> V. C. Rubin., The rotation of spiral galaxies, *Science*, vol. 220, pp. 1339-1344, 1983.

ABONNEZ-VOUS À Pour la Science

OFFRE D'ABONNEMENT DURÉE LIBRE

2 FORMULES AU CHOIX

	FORMULE PAPIER + HORS-SÉRIE	FORMULE INTÉGRALE
Le magazine papier 12 numéros par an	✓	✓
Le magazine en version numérique 12 numéros par an		✓
Le hors-série papier 4 numéros par an	✓	✓
Le hors-série en version numérique 4 numéros par an		✓
Accès à pourlascience.fr actus, dossiers, archives depuis 1996		✓
VOTRE TARIF D'ABONNEMENT	**6,50 €** PAR MOIS	**8,20 €** PAR MOIS
	31 % de réduction *	**43 %** de réduction *

BULLETIN D'ABONNEMENT

À renvoyer accompagné de votre règlement à :

Service Abonnement Groupe Pour la Science – 235 avenue Le Jour se Lève – 92100 Boulogne Billancourt – email : serviceclients@groupepourlascience.fr

PAG22STDDOS

☑ **OUI, je m'abonne à Pour la Science en prélèvement automatique**

1 / **Je choisis ma formule** (merci de cocher) et je complète l'autorisation de prélèvement ci-dessous.

☐ FORMULE **PAPIER + HORS SÉRIE**
- 12 n° du magazine papier
- 4 Hors-série papier

6,50€ PAR MOIS -31 %

1-F-HSPAP-N-3PVT-6,5€

☐ FORMULE **INTÉGRALE**
- 12 n° du magazine (papier et numérique)
- 4 Hors-série (papier et numérique)
- Accès illimité aux contenus en ligne

8,20€ PAR MOIS -43 %

1-F-INT-N-3PVT-8,2€

2 / **Mes coordonnées**

Nom : .....

Prénom : .....

Adresse : .....

.....

Code postal ☐☐☐☐☐ Ville : .....

Tél. : ☐☐☐☐☐☐☐☐☐☐

Courriel : ..... @ .....

(indispensable pour la formule intégrale)

J'accepte de recevoir les offres de Pour la Science ☐ OUI ☐ NON

3 / **Mandat de prélèvement SEPA**

En signant ce mandat SEPA, j'autorise Pour la Science à transmettre des instructions à ma banque pour le prélèvement de mon abonnement dès réception de mon bulletin. Je bénéficie d'un droit de rétractation dans la limite de 8 semaines suivant le premier prélèvement. Plus d'informations auprès de mon établissement bancaire.

TYPE DE PAIEMENT : PAIEMENT RÉCURRENT

Titulaire du compte

Nom : ..... Prénom : .....

Adresse : .....

.....

Code postal ☐☐☐☐☐ Ville : .....

Désignation du compte à débiter

BIC (Identification internationale de la banque) ☐☐☐☐☐☐☐☐☐☐☐

IBAN ☐☐☐☐☐☐☐☐☐☐☐☐☐☐☐☐☐☐☐☐☐☐☐☐☐☐

(Numéro d'identification international du compte bancaire)

Établissement teneur du compte

Nom : .....

Adresse : .....

Code postal ☐☐☐☐☐ Ville : .....

Date et signature

Organisme Créancier : Pour la Science
170 bis, bd. du Montparnasse – 75014 Paris
N° ICS FR92ZZZ426900
N° de référence unique de mandat (RUM)

4 / **MERCI DE JOINDRE IMPÉRATIVEMENT UN RIB**

Partie réservée au service abonnement. Ne rien inscrire

* Réduction par rapport au prix de vente en kiosque et l'accès aux archives numériques. Durée d'abonnement : 1 an. Délai de livraison : dans le mois suivant l'enregistrement de votre règlement. Offre valable jusqu'au 31/03/2023 en France métropolitaine uniquement. Pour un abonnement à l'étranger, merci de consulter notre site boutique.groupepourlascience.fr. Photos non contractuelles. Vous pouvez acheter séparément les numéros de *Pour la Science* pour 6,90 € et les hors-séries pour 7,90 €. En souscrivant à cette offre, vous acceptez nos conditions générales de vente disponibles à l'adresse suivante : https://rebrand.ly/CGV-PLS.

Les informations que nous collectons dans ce bulletin d'abonnement nous aident à personnaliser et à améliorer les services que nous vous proposons. Nous les utiliserons pour gérer votre accès à l'intégralité de nos services, traiter vos commandes et paiements, et vous faire part notamment par newsletters de nos offres commerciales moyennant le respect de vos choix en la matière. Le responsable du traitement est la société *Pour la Science*. Vos données personnelles ne seront pas conservées au-delà de la durée nécessaire à la finalité de leur traitement. *Pour la Science* ne commercialise ni ne loue vos données à caractère personnel à des tiers. Les données collectées sont exclusivement destinées à *Pour la Science*. Nous vous invitons à prendre connaissance de notre charte de protection des données personnelles à l'adresse suivante : https://rebrand.ly/charte-donnees-pls. Conformément à la réglementation applicable (et notamment au Règlement 2016/679/UE dit «RGPD») vous disposez des droits d'accès, de rectification, d'opposition, d'effacement, à la portabilité et à la limitation de vos données personnelles. Pour exercer ces droits (ou nous poser toute question concernant le traitement de vos données personnelles), vous pouvez nous contacter par courriel à l'adresse protection-donnees@pourlascience.fr.

Groupe Pour la Science - Siège social : 170 bis, boulevard du Montparnasse, CS20012, 75680 Paris cedex 14 – Sarl au capital de 32 000€ – RCS Paris B 311 797 393 – Siret : 311 797 393 000 23 – APE 58.14 Z

Si la nature de la matière noire n'est pas encore élucidée, ce n'est pas faute de candidats. Les corps massifs ont eu la cote, mais désormais la recherche s'oriente plutôt du côté des particules.

Beaucoup d'appelés, pas encore d'élu

Marco Cirelli

© Tomasz Walenta

S'il fallait rédiger une annonce, elle commencerait ainsi : « Recherche nouvelle forme de matière avec des interactions très faibles, voire nulles, à la fois avec la matière ordinaire et avec elle-même. » Qui cherchons-nous ? Tout simplement la matière noire, qui compose 27 % de l'Univers (la matière visible décrite par le modèle standard n'en représentant que 5 %). On ignore tout d'elle, à part qu'elle existe *(voir L'insaisissable matière noire par P. Gagnon, page 92)*. Reprenons les termes de l'annonce. L'agitation thermique de cette matière inconnue doit être minime, ce qui revient à dire qu'elle doit être constituée de corps qui se déplacent lentement. Dans le cas contraire, les particules s'échapperaient dans un mouvement chaotique et les grandes structures de l'Univers ne se seraient pas formées. Elle doit aussi être stable, c'est-à-dire non sujette à la désintégration naturelle, car elle était présente dans le bouillon chaotique de l'Univers primitif et elle l'est toujours dans les galaxies observées aujourd'hui, confirmant que sa « durée de vie moyenne » est très longue, voire infinie.

En résumé, la candidate idéale est invisible, froide, stable et interagit peu. On ne s'étonnera pas que la science ait d'abord cherché à la recruter parmi les corps célestes les plus bizarres. Par exemple : des astéroïdes compacts trop petits pour être détectés, ou des planètes détachées de leur orbite et trop sombres à voir, ou encore des étoiles mortes… Ce type de corps massifs, collectivement appelés MACHO pour *massive compact halo objects*, aurait le profil de l'emploi. L'exemple parfait serait une population de trous noirs errants : il s'agit d'objets par définition invisibles, peu interactifs, car éloignés et isolés, lents en raison de leur masse importante et immuables en tant qu'étape terminale de l'évolution stellaire.

Les MACHO ont été activement recherchés dans les années 1980 et 1990, en utilisant le phénomène de lentille gravitationnelle *(voir L'insaisissable matière noire, par P. Gagnon, page 92)* : si la Galaxie était remplie de ces objets, l'un d'eux serait probablement passé devant une étoile, provoquant une déformation de l'image et de l'intensité lumineuse perçue. Les recherches ont cependant été infructueuses, et ces objets ne peuvent prétendre constituer la totalité de la matière noire.

TROUS NOIRS : ILS FONT LEUR GRAND RETOUR

Pourtant, les MACHO n'ont pas été abandonnés et ils font un retour remarqué aujourd'hui avec l'idée de trous noirs d'une taille telle qu'ils n'engendrent pas d'effet de lentille gravitationnelle : soit ils sont trop petits pour dévier le cours de la lumière, soit ils sont très grands, donc très rares, et la probabilité de les observer est infime ; dans les deux cas, les limites mentionnées s'évaporent. Ces objets correspondent aux trous noirs primordiaux proposés par Stephen Hawking dans les années 1970. Créés dans les tout premiers instants après le Big Bang, ils auraient été complètement découplés du reste de la matière par la suite. La fusion de certains pourrait même avoir été détectée dès 2015 par les interféromètres à ondes gravitationnelles *Ligo* et *Virgo*. Néanmoins, le sujet est chaudement débattu et davantage d'études sont nécessaires

En bref

> Les physiciens ignorent ce qui constitue la matière noire (27 % de l'Univers).

Les corps célestes massifs ont d'abord été perçus comme des candidats plausibles.

> Les scientifiques privilégient désormais l'hypothèse de nouvelles particules élémentaires, comme les neutralinos, dans le cadre de théories au-delà du modèle standard.

> Une autre hypothèse audacieuse postule que les particules concernées auraient leur origine dans des dimensions supplémentaires de l'espace-temps, enroulées et imperceptibles.

> La réécriture des lois de la gravitation est aussi une option.

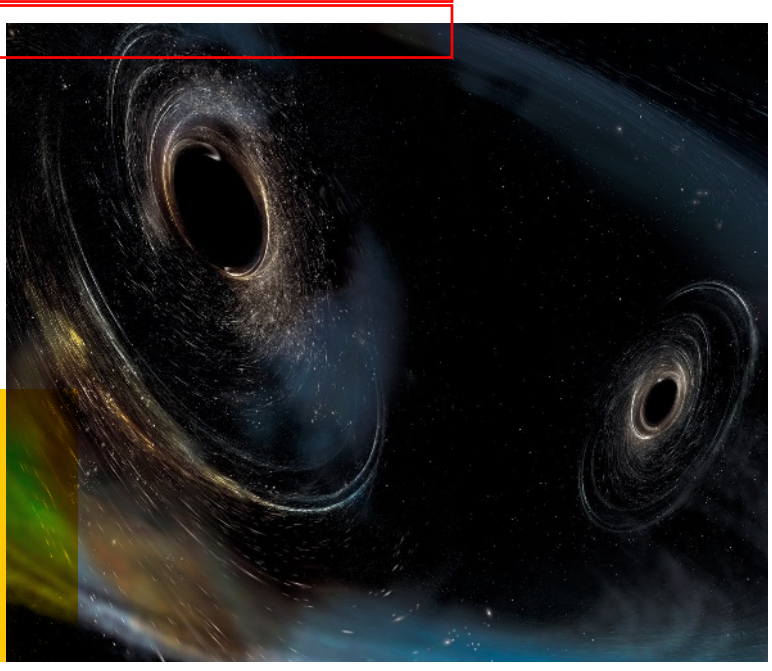
pour vérifier si la quantité, la distribution et les propriétés de ces corps sont vraiment adéquates pour expliquer la matière noire.

Convaincus que la matière noire ne peut pas être constituée d'objets astrophysiques macroscopiques, des physiciens ont tourné leur attention vers les particules élémentaires. L'idée était qu'une grande quantité de gaz diffus composé de particules avec les bonnes propriétés serait responsable de la masse manquante. Mais rapidement, on se retrouva à nouveau dans une impasse : aucune des particules connues et décrites par le modèle standard ne coche toutes les cases !

Les neutrinos sont celles qui s'en approchent le mieux : ils sont stables, sans charge électrique (donc sans interaction avec le rayonnement électromagnétique) et n'interagissent que par l'intermédiaire de la force faible, l'une des trois grandes forces fondamentales considérées par le modèle standard *(voir les Repères page 6)*. Cependant, les mesures cosmologiques indiquent qu'ils ont une masse. Problème : des particules même très légères sont faciles à bousculer et donc acquièrent aisément une énergie thermique au contact du bain chaud de l'Univers primitif, invalidant ainsi la condition de particules « froides ».

En conséquence, les physiciens pensent désormais que le problème de la matière noire est l'un des indices les plus concrets de l'existence de nouvelles particules, et donc d'une « nouvelle physique » encore inconnue. Pour comprendre la portée révolutionnaire de ces propositions, il est utile de passer en revue les hypothèses les plus étudiées.

La matière noire pourrait être constituée de particules prédites par une théorie hypothétique



© LIGO/Caltech/MIT/Sonoma State (Aurore Simonnet)

→ Les corps célestes macroscopiques n'apparaissent plus comme les candidats les plus crédibles au poste de matière noire, à l'exception peut-être des trous noirs primordiaux.

dite « de supersymétrie ». Cette théorie, initialement proposée dans les années 1970 puis continuellement mise à jour, formule un postulat audacieux et surprenant : pour chaque type de particules actuellement connu, il y aurait une particule jumelle aux propriétés similaires, mais pas exactement équivalentes, qui serait jusqu'ici passée inaperçue, car inaccessible à nos outils de recherche. Si ces particules exotiques, appelées « partenaires supersymétriques », existent, l'une d'entre elles pourrait constituer la matière noire.

L'IMPOSSIBILITÉ D'UNE SYMÉTRIE PARFAITE

Mais reprenons les choses dans l'ordre. Il est bien établi que les particules du modèle standard appartiennent à deux grandes catégories *(voir les Repères, page 6)* : les fermions (comme les électrons, les quarks et les leptons) et les bosons (dont la particule de Higgs, les photons et les particules médiatrices de force). La différence entre elles tient à une propriété intrinsèque des particules, appelée « spin ». Des considérations mathématiques assez complexes ont conduit les physiciens théoriciens dans les années 1970 à émettre l'hypothèse d'un lien profond entre les deux classes de particules. Ce lien associe un boson à chaque fermion, et inversement. Une telle association rend chaque particule plus complète, comme le côté droit d'un visage réfléchi dans un miroir complète le côté gauche. C'est pourquoi on parle de symétrie, ou plus précisément de supersymétrie (notée SuSy). Une symétrie, en physique et aussi dans la nature, rend en général une théorie plus élégante et cohérente. Dans ce cas, SuSy remédie à une inquiétante incohérence interne du modèle standard qui conduirait à prédire une masse pour le boson de Higgs bien supérieure à celle mesurée. Surtout, elle fait l'hypothèse de l'existence d'un partenaire pour chaque particule connue : outre l'électron, il existerait un superélectron (ou « sélectron »), doté des mêmes propriétés à ceci près que c'est un boson ; et, de même, le « photino » serait à tous égards semblable au photon, à l'exception de sa nature de fermion.

Or, une symétrie aussi parfaite n'est clairement pas réaliste : s'il existait vraiment un sélectron de même masse que l'électron, nous l'aurions déjà remarqué ! Il y aurait de la

Si le sélectron, le partenaire supersymétrique de l'électron, existait et avait la même masse, nous l'aurions remarqué !

Des scientifiques travaillent sur le cœur de l'expérience *CRESST* avant de l'installer dans le laboratoire souterrain de Gran Sasso, en Italie. Le dispositif contient des cristaux très purs, sensibles au passage des particules de matière noire qui sillonneraient la Galaxie et traverseraient la Terre.

sélectricité, des sampoules, des sélectriciens ! L'expérience montre donc que la symétrie doit être « brisée » : les masses des particules supersymétriques seraient bien plus grandes que celles des particules ordinaires. La théorie perd beaucoup de son élégance, mais, au moins, elle évite les absurdités flagrantes. Étant plus lourdes, les particules supersymétriques se désintègrent en particules plus légères, y compris en celles du modèle standard, et cessent ainsi d'exister. Toutes sauf une.

En réalité, SuSy intègre un mécanisme, la R-parité, nécessaire pour être en accord avec les observations expérimentales, qui garantit la stabilité absolue de la particule supersymétrique la plus légère. Si cette particule est par exemple le partenaire de la particule Z du modèle standard, on se retrouve avec un candidat idéal de matière noire ! Une particule neutre, lourde et donc froide et stable grâce à la R-parité. Les particules de ce type, collectivement appelées « neutralinos », sont généralement de bons candidats pour la matière noire. La théorie n'est pas capable d'en prédire la masse de manière unique, mais seulement d'indiquer une valeur autour de 100 fois la masse d'un proton, avec une grande marge de variabilité.

Ainsi, une solution possible au problème de la matière noire émerge d'une théorie comme la supersymétrie, qui est complexe, fascinante et apparemment sans rapport avec les phénomènes pertinents aux échelles cosmologiques. Voici un cas exemplaire du contact entre la physique de l'infiniment petit et de l'infiniment grand. Si l'hypothèse est correcte, la matière noire serait le premier signal d'un monde parallèle fait de particules lourdes. Une éventuelle preuve de l'existence des neutralinos résoudrait le problème cosmologique crucial de la « masse manquante » et en même temps révélerait l'autre moitié d'un monde subatomique extraordinaire jusqu'alors ignoré.

DES PARTICULES ENROULÉES DANS CINQ DIMENSIONS

Selon une autre hypothèse, la matière noire serait constituée de particules liées à l'existence d'un espace multidimensionnel plus complexe et étendu que celui que nous connaissons. Certaines théories stipulent, en effet, que notre monde ne serait que le « rez-de-chaussée » d'un immeuble avec un nombre infini de niveaux : les étages supérieurs contiendraient des copies lourdes des particules du modèle standard et l'une d'entre elles serait la matière noire. Même si le concept de copies exotiques de particules rappelle la supersymétrie, l'idée de base est radicalement différente et peut-être encore plus étonnante.

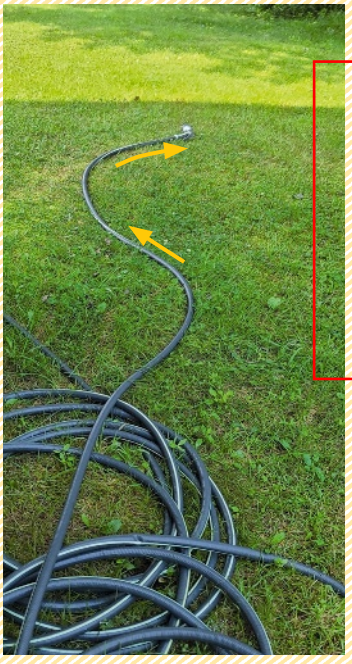
© Astrid Eckert

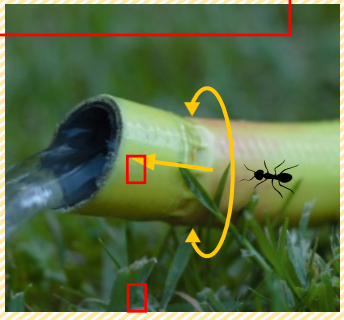
Cette théorie pose que l'espace-temps n'est pas simplement constitué des trois dimensions qui nous sont familières, plus le temps ; mais qu'en chaque point il y a une ou plusieurs dimensions spatiales supplémentaires, enroulées en anneaux extrêmement petits et donc imperceptibles. L'idée fut proposée par les physiciens Theodor Kaluza et Oskar Klein dès les années 1920, puis largement oubliée. Elle est revenue au premier plan à la fin des années 1990 pour des raisons liées en partie à la solution de l'incohérence interne du modèle standard concernant la masse du boson de Higgs, que nous avons déjà mentionnée. Une version de ces théories fait également partie intégrante de la théorie des cordes.

Pour comprendre de quoi nous parlons, utilisons une analogie classique, popularisée entre autres par Lisa Randall, physicienne théoricienne à l'université Harvard. Imaginons un tuyau d'arrosage posé sur la pelouse : vu de loin, il nous apparaît comme une ligne, c'est-à-dire un objet unidimensionnel. Cependant, à mesure que nous nous approchons, nous nous rendons compte que l'objet a une dimension transversale, de forme circulaire, si petite qu'elle est invisible de loin, mais très concrète et évidente de près. Par exemple, une fourmi est capable de parcourir la dimension linéaire « infinie » du tuyau aussi facilement que la dimension circulaire finie. L'idée de base des théories extradimensionnelles est que l'espace-temps lui-même ressemble à ce tuyau : chaque point (x, y, z, plus le temps t) serait en fait aussi le siège d'un anneau infinitésimal d'une nouvelle dimension. La réalité serait donc en fait 5-dimensionnelle ; et les particules élémentaires seraient des entités à cinq dimensions, capables de parcourir cet espace-temps étendu exactement comme la fourmi parcourt toutes les directions du tuyau. Le fait que la dimension supplémentaire soit refermée sur elle-même a une conséquence importante pour les propriétés des particules.

Reprenons l'analogie en forçant un peu ses limites pour voir quelle est cette conséquence. Imaginons une petite colonie de fourmis, toutes identiques et de même masse m, marchant le long du tuyau. La première fourmi ne fait que parcourir la direction rectiligne à une vitesse v. La deuxième fourmi, elle, a l'habitude de faire le tour du tuyau au fur et à mesure qu'elle le longe. Pour nous, observateurs éloignés qui ne voyons pas la dimension circulaire, le résultat est que la fourmi semble se déplacer dans une direction droite à une vitesse plus lente, disons de la moitié : $v/2$. Nous nous dirions alors : ce doit être une fourmi plus grosse, de masse $2m$. Quant à la troisième fourmi, elle se plaît à faire deux tours autour du tuyau au fur et à mesure qu'elle le parcourt : de loin elle paraît avancer avec une vitesse $v/3$ et on dira qu'elle a une

Technibaryons, Q-balls, pépites de quarks : derrière les hypothèses aux noms facétieux, il y a un travail scientifique rigoureux





Pour un œil humain, un tuyau vu de loin est comparable à une droite, avec une seule dimension. Pour une fourmi se déplaçant dessus, en revanche, il y a clairement deux dimensions. Suivant cette analogie, selon l'échelle à laquelle on les observe, des particules pourraient aussi se dissimuler dans des dimensions cachées.

© Patrick Hatt/shutterstock.com, shutterstock.com

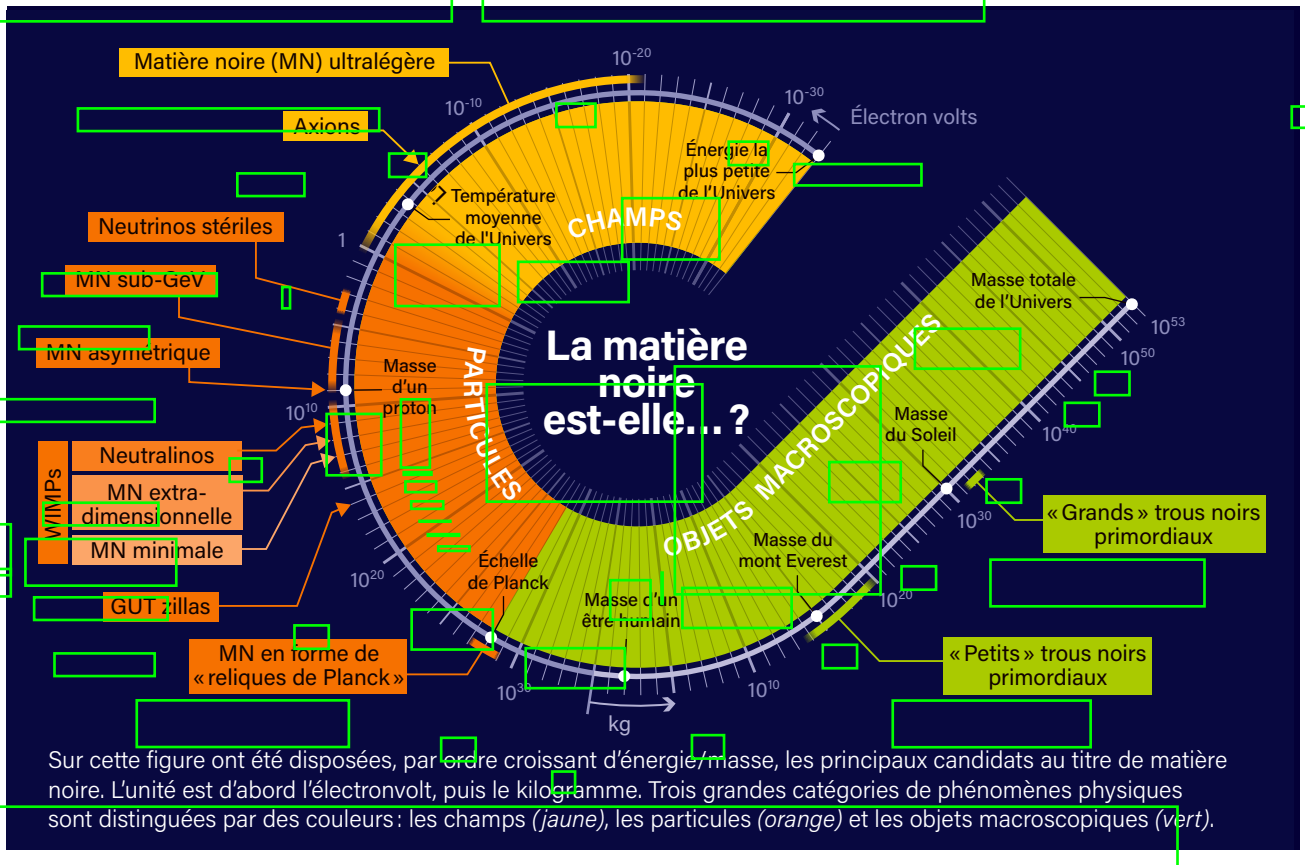
masse de *3m*. Et ainsi de suite. La colonie de fourmis, toutes de masse identique, nous semble donc constituée d'insectes de masse *m, 2m, 3m, 4m*, etc.

En pratique, un observateur ignorant l'existence de la dimension supplémentaire interprète comme une masse supplémentaire ce qui est en fait une impulsion confinée dans cette dimension. De même, une particule 5-dimensionnelle de masse *M* apparaît à un observateur comme une série infinie de particules de masse *M*, *2M*, *3M*, etc. On parle de tour de particules de Kaluza-Klein : celles du niveau de base sont les particules bien connues du modèle standard, tandis que celles des niveaux suivants sont des copies identiques, mais plus massives. Grâce à un mécanisme similaire à celui de la R-parité en supersymétrie, une des particules neutres du premier niveau serait stable et constituerait donc un candidat idéal pour la matière noire ! Sa masse est associée à la taille de la dimension supplémentaire et est donc un paramètre dépendant de la théorie : typiquement, les prédictions sont d'environ 1 000 fois la masse du proton, avec là encore une grande marge de variabilité.

Dans ce cas également, une solution possible au problème de la matière noire émerge d'une hypothèse audacieuse, comme celle des dimensions supplémentaires. Si ces théories sont correctes, découvrir la matière noire équivaudra littéralement à découvrir des dimensions entières de la réalité pour l'instant inexplorées.

MATIÈRE NOIRE GONFLABLE… OU CANNIBALE ?

Du neutrino stérile *(voir La possible fécondité du neutrino stérile par W. C. Louis et R. Van de Water, page 26)* à l'axion *(voir La physique passe à l'axion par C. Prescod-Weinstein, page 36)*, beaucoup d'autres candidats ont été ou sont encore proposés par les physiciens, bien trop pour que l'on puisse en rendre compte ici. Les

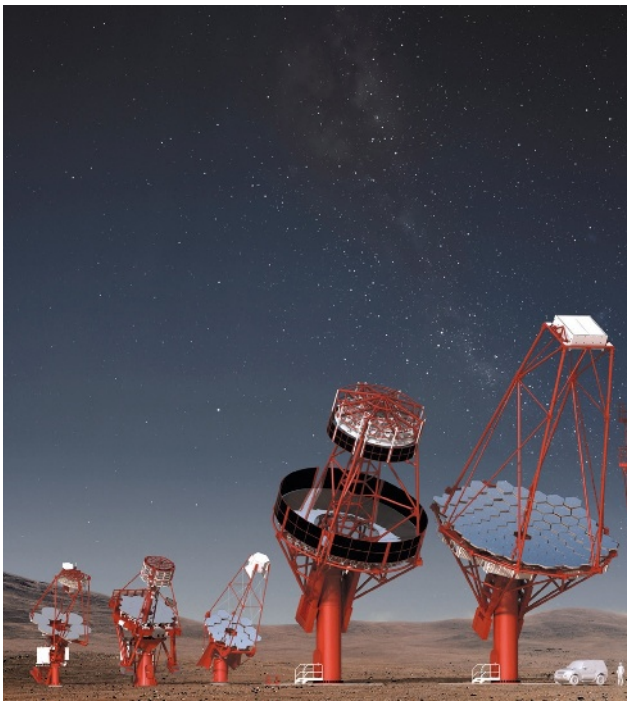


Sur cette figure ont été disposées, par ordre croissant d'énergie/masse, les principaux candidats au titre de matière noire. L'unité est d'abord l'électronvolt, puis le kilogramme. Trois grandes catégories de phénomènes physiques sont distinguées par des couleurs : les champs *(jaune)*, les particules *(orange)* et les objets macroscopiques *(vert)*.

© Bruno Bourgeois/Pour la Science - Données Marco Cirelli

Et si l'Histoire bégayait ?

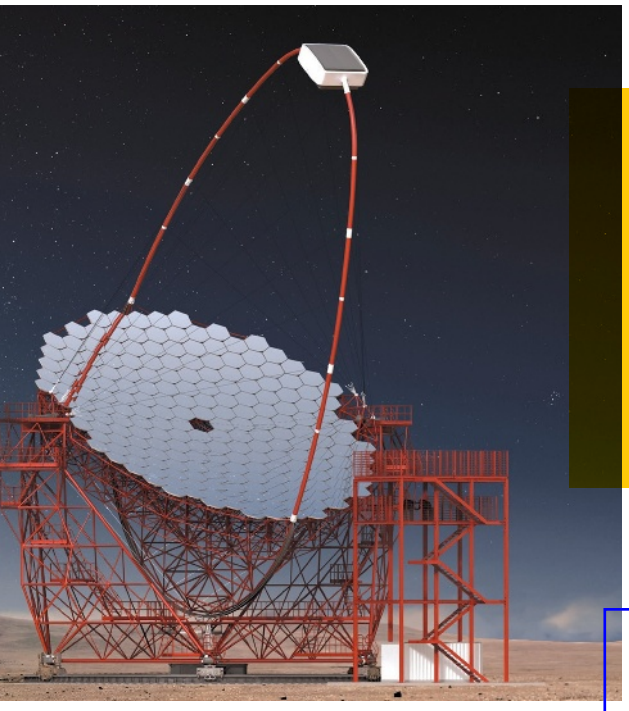
Dans les années 1840, les astronomes sont aux prises avec un défi : l'orbite de la planète Uranus, à l'époque planète la plus lointaine du Système solaire, montre certaines irrégularités en contradiction avec les lois de la mécanique céleste newtonienne. Ce qui conduit Urbain Jean Joseph Le Verrier, astronome à l'Observatoire de Paris, à postuler l'existence d'une « planète manquante » dont l'influence gravitationnelle expliquerait les anomalies de l'orbite d'Uranus. En effet, une telle planète, nommée Neptune, est découverte en 1846 par Johann Gottfried Galle, un astronome de Berlin, presque exactement au point indiqué par les calculs de Le Verrier. Un peu plus tard, c'est Mercure qui attire l'attention des astronomes : son mouvement montre également une anomalie, la précession du périhélie, non prédite par la gravité newtonienne. Le Verrier, sûr de son coup, l'interprète une nouvelle fois comme l'effet de la présence d'une autre planète, appelée Vulcain, très proche du Soleil. Malgré des décennies de recherches, et même de fausses découvertes, Vulcain n'a jamais été trouvée. En revanche, Einstein a démontré comment l'anomalie est due à une correction de la gravité newtonienne à proximité d'un corps extrêmement massif comme le Soleil et est parfaitement prédite par la théorie de la relativité générale. L'analogie avec la situation actuelle est évidente : les « anomalies » en astrophysique et en cosmologie sont-elles liées à la matière (noire), comme dans le cas de Neptune ? Ou bien sont-elles un signe d'échec des lois de la gravité, comme dans le cas de Mercure ?



© CTAO/ESO/Gabriel Pérez Díaz (IAC)

particules SuSy et extradimensionnelles font partie de la classe des WIMPS (pour *weakly interacting massive particles*), très populaires car leur mécanisme de production dans l'Univers primordial est particulièrement convaincant. Chaque jour, ou presque, la littérature scientifique s'enrichit de nouvelles propositions : les technibaryons, les WIMPzillas, les GUTzillas, les Q-balls, les pépites de quarks… Ou de modèles tels que la matière noire minimale, mimétique, fluorescente, gonflable, cannibale… et ainsi de suite. Les qualificatifs en apparence facétieux ne doivent pas tromper : dans la plupart des cas, il y a derrière un travail scientifique rigoureux, nécessaire pour construire une théorie qui soit en accord avec les données et qui fournisse des prévisions vérifiables. L'un de ces candidats et l'un de ces modèles seront, espérons-le, celui vraiment choisi par la nature.

Même si l'hypothèse de nouvelles particules élémentaires est de loin la plus accréditée dans la communauté des physiciens, pour toutes les bonnes raisons déjà évoquées, il est important de ne négliger aucune autre piste, au moins jusqu'à ce qu'une solution convaincante soit trouvée. Une hypothèse radicale s'inspire de la remarque, extrêmement importante, que les manifestations



← Projet européen, l'observatoire *CTA (Cherenkov Telescope Array)* vise à déployer, au Chili (hémisphère sud) et aux îles Canaries (hémisphère nord), une centaine de télescopes sensibles aux rayons gamma produits par les particules de matière noire dans le halo de la Galaxie. Cette vue d'artiste traduit la diversité des équipements nécessaires : entre 8 mètres de haut pour 8 tonnes et 45 mètres pour 100 tonnes.

attribuées à la matière noire ont seulement à voir avec la gravité. La question surgit alors spontanément : au lieu de postuler l'existence d'une masse manquante, ne serait-ce pas la loi de la gravité qu'il faut changer ? Après tout, au XIXe siècle, l'astronomie a déjà vécu un épisode comparable *(voir l'encadré page ci-contre)*. La possibilité de repenser la gravitation a été considérée, depuis les années 1980, par une série de théories dites « MOND » *(modified newtonian dynamics)*, qui réécrivent, sous différentes formes, les lois de Newton et d'Einstein dans les conditions propres des galaxies et des grandes structures. Pour le moment, aussi simples et suggestives soient-elles, MOND et ses consœurs n'ont pas encore réussi à expliquer toutes les manifestations attribuables à la matière noire à toutes les échelles. C'est pourquoi la communauté reste en grande majorité convaincue par l'idée de particules supplémentaires.

En vérité, physique des particules et cosmologie n'ont jamais été avares en hypothèses apparemment bizarres (quoique fondées sur des indices solides), mais qui se sont révélées exactes. Pensons aux neutrinos, inventés en 1930 par Wolfgang Pauli presque par désespoir et révélés en 1956. Pensons au cas du boson de Higgs, postulé en 1964 comme conséquence d'une substance mystérieuse (le champ de Higgs) qui imprègne l'ensemble de l'Univers et confirmé en 2012. La particule de matière noire sera peut-être la prochaine grande découverte, attendue depuis quatre-vingts ans. L'histoire de la physique nous enseigne que, souvent, quand il s'agit de pénétrer les concepts les plus fondamentaux de la nature, il faut faire preuve d'audace dans les propositions et… de patience dans l'attente des réponses.

— **L'auteur** —

> Marco Cirelli
est physicien au Laboratoire de physique théorique et hautes énergies (LPTHE - CNRS & Sorbonne Université)

— **À lire** —

> M. Cirelli *et al.,* *Dark matter*, à paraître dans *arXiv*, 2022.

> M. Cirelli *et al.,* Voyager 1 electrons and positrons further constrain primordial black holes as dark matter, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 122, 2019.

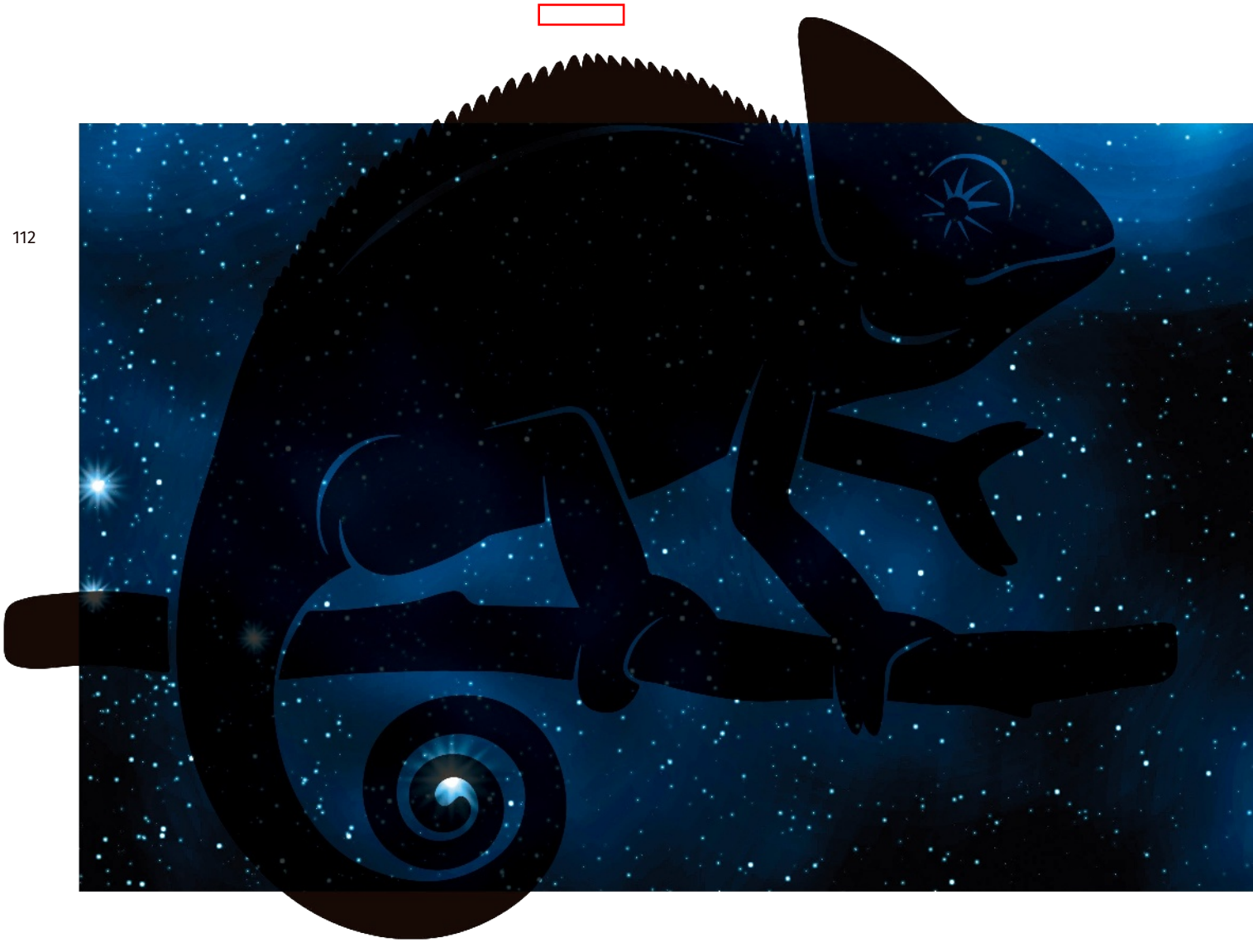
> S. Profumo, *An Introduction to Particle Dark Matter*, World Scientific, 2017.

> G. Bertone *et al.,* *Particle Dark Matter : Observations, Models and Searches*, Cambridge University Press, 2010.

> D. Hooper, *Dark Cosmos : In Search of Our Universe's Missing Mass and Energy*, Smithsonian Books, 2009.

Les cachotteries de l'énergie sombre

Philippe Brax



Depuis 1998, l'accélération de l'expansion de l'Univers reste inexpliquée, car rien dans le modèle standard ne permet de la comprendre. Faut-il miser sur une constante cosmologique ? Ou plutôt sur les effets d'une énergie sombre aux propriétés de caméléon ?

© shark_749/shutterstock.com et nata_kolosov/shutterstock.com

Matière et lumière : dès les années 1930, Albert Einstein et Willem de Sitter ont posé sur ces deux piliers les bases de la cosmologie physique, l'une et l'autre se diluant à mesure que l'Univers s'étendait. En regardant vers le passé, Georges Lemaître avait postulé au même moment l'existence du Big Bang, la singularité initiale dont notre Univers semble issu. Plus tard, l'origine de la formation des éléments, comme les atomes, avait été parfaitement incluse dans ce cadre. Seule l'observation de la dynamique des étoiles lointaines avait commencé à bousculer ce bel ordonnancement, et à poser la question délicate de l'origine de la matière noire qui semble englober d'un halo chaque galaxie.

Dans ce contexte, autant dire que bien peu de scientifiques s'attendaient aux surprises de 1998. Cette année-là, deux équipes distinctes, mais utilisant le même marqueur céleste – la fin de vie d'un couple d'étoiles, les supernovæ de type Ia –, concluent dans le même sens : l'expansion de l'Univers s'accélère ; elle est plus rapide aujourd'hui qu'à l'origine. Depuis, physiciens, astronomes et astrophysiciens cherchent non seulement à en comprendre la cause, mais guettent aussi d'autres phénomènes dans lesquels le même mécanisme se manifesterait. C'est ainsi que la notion d'« énergie sombre » a émergé comme une réponse possible au calcul, sur la base des observations de 1998, qu'environ 70 % du contenu énergétique de l'Univers ne pouvait être constitué ni de matière ni de rayonnement. Adieu le diptyque « matière et lumière » ! L'énergie sombre serait un fluide uniforme distribué dans les moindres recoins de l'Univers. Elle est désormais traquée en utilisant toute la panoplie des observations et expériences que l'ingéniosité de la science peut déployer. Mais rien n'est encore venu éclairer notre lanterne.

UNE SURPRISE PAS SURPRENANTE

Si cette découverte fut une surprise observationnelle, la possibilité que l'expansion de l'Univers puisse accélérer n'était pas une nouveauté. C'est même un sujet qui fit débat il y a cent ans lorsque les physiciens commencèrent à s'intéresser à l'évolution temporelle de l'Univers en utilisant les toutes nouvelles lois de la gravitation qu'Einstein avait édictées en 1915 et réunies sous le nom de « relativité générale ». Dès 1919, de Sitter avait montré qu'un Univers vide, mais où existait une constante dite « cosmologique positive », serait en accélération éternelle. En d'autres termes, son taux d'expansion, qui mesure la façon dont deux galaxies s'éloignent l'une de l'autre au cours du temps, croîtrait indéfiniment : l'Univers semblerait lancé dans une course folle toujours plus rapide. Et tout ceci simplement à cause de la constante cosmologique.

Il faut se souvenir qu'Einstein avait introduit cet addenda à la relativité générale en 1917 pour une raison exactement opposée. En effet, selon sa conception très aristotélicienne, l'Univers possédait une géométrie sphérique, était composé de matière et était statique dans le temps. Pour qu'un tel Univers soit solution des

équations de la relativité générale, adjoindre à cette théorie un terme était indispensable : ainsi est née la constante cosmologique. C'est Alexandre Friedmann, au début des années 1920, qui résoudra les équations de la relativité générale en présence de matière et d'une constante cosmologique et montrera que, contrairement à ce qu'Einstein avait postulé, la relativité générale avait presque toujours pour solution des univers en expansion. Cela fut confirmé par l'observation du mouvement des galaxies peu de temps après en 1927 par Edwin Hubble et Georges Lemaître. La constante cosmologique semblant privée de toute raison d'être, Einstein et de Sitter proposèrent en 1932 un modèle d'Univers fait de radiations et de matière, mais dépourvu de constante.

Néanmoins, dès 1928, les physiciens Wolfgang Pauli et Pascual Jordan furent les premiers à tenter de donner une origine physique à la constante cosmologique en la reliant à l'énergie du vide. En effet, en mécanique quantique, le vide n'est pas l'absence de tout phénomène physique ; à chaque instant des paires particule-antiparticule apparaissent et disparaissent. Le bilan de ce foisonnement est qu'en moyenne, le vide possède une énergie et que celle-ci joue pour l'Univers le même rôle qu'une constante cosmologique. Cette observation est d'une richesse que les physiciens n'ont pas encore complètement exploitée.

Malheureusement, le calcul de cette énergie du vide par Pauli et Jordan donne un résultat si grand que, si on l'appliquait à l'Univers statique d'Einstein, celui-ci tiendrait entre la Terre et la Lune. Cet échec retentissant a conduit les cosmologues à se cacher la tête dans le sable pendant des décennies. Aujourd'hui encore, ils sont toujours dans l'incapacité de calculer l'énergie du vide dans le cadre du modèle standard. Seule une théorie complète comme pourrait l'être la théorie des cordes le rendrait possible. En pratique, c'est encore loin d'être faisable.

Pourtant, la nécessité d'une constante cosmologique avait commencé à faire son retour dès la fin des années 1950, quand l'astronome Allan Sandage montra que l'âge de certaines étoiles semblait être plus grand que celui déduit du modèle d'Univers d'Einstein-de Sitter. Ce paradoxe est levé s'il existe une constante cosmologique. Les observations depuis 1998 lui ont d'ailleurs donné une valeur : elle est incroyablement petite, 29 ordres de grandeur plus petite même que la densité de l'eau. Rien dans les théories de la physique subatomique ne permet de rendre compte d'une telle valeur, si ténue qu'elle pourrait mettre la cosmologie dans une impasse théorique.

UNE PRESSION NÉGATIVE

Cependant, même si la constante cosmologique rend compte des observations, il est tout à fait envisageable que l'accélération soit liée non à une propriété immuable de l'Univers, mais à un phénomène dont l'accélération serait la conséquence. Par exemple, une nouvelle forme d'énergie, qui dicterait la dynamique de l'Univers actuel : la fameuse énergie sombre. Aucune théorie n'en existe encore, et seules certaines de ses caractéristiques sont connues.

Aux plus grandes échelles comme celles du cosmos, elle se comporte comme un fluide

En bref

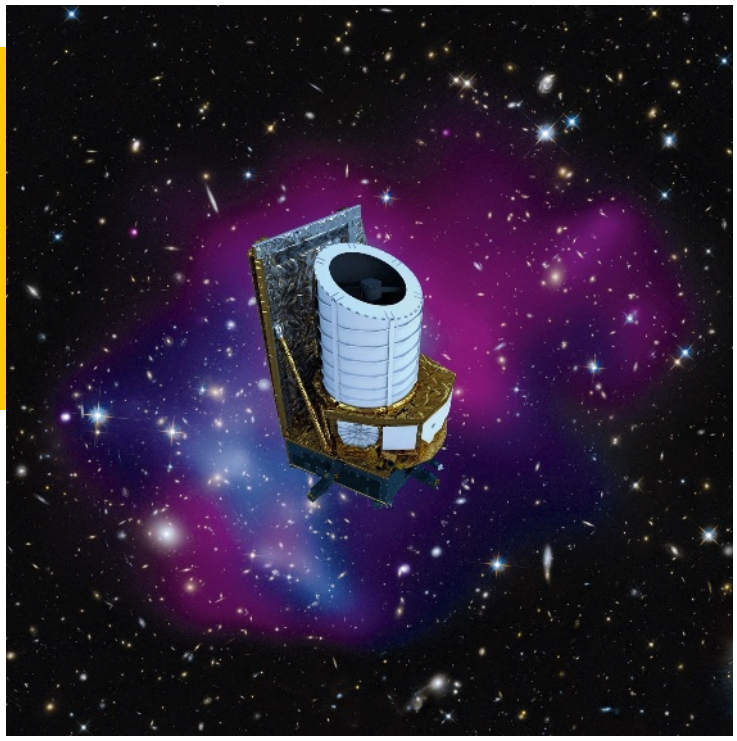
> En 1998, une accélération de l'expansion de l'Univers a été mesurée sans qu'on puisse l'expliquer.

> Avec l'hypothèse d'une constante cosmologique, débattue dès le début du XXe siècle et toujours défendue, cette accélération serait une propriété intrinsèque de l'Univers.

> Selon une autre hypothèse, l'Univers subirait l'effet d'une énergie sombre dont la physique reste inconnue.

> Les champs de matière sombre pourraient agir différemment selon les échelles et la densité de matière, s'adaptant ainsi à leur environnement. Cette hypothèse porte le nom de « champ caméléon ».

La mission *Euclid*, prévue pour courant 2022, sera en mesure de scruter la forme et le décalage vers le rouge des galaxies sur les 10 derniers milliards d'années. De quoi mieux mesurer l'accélération de l'expansion de l'Univers et préciser, peut-être, la nature de l'énergie sombre.



© ESA/ATG medialab (spacecraft); NASA, ESA, CXC, C. Mancini (University of Hawai'i/IfA), et al. and STScI (background)

qui affiche des caractéristiques de pression et de densité d'énergie très singulières. En effet, tout se passe comme si la pression était négative et exactement opposée à la densité d'énergie, cette dimension négative étant la cause de l'accélération de l'expansion. Si, dans l'histoire de l'Univers, la pression n'a pas toujours été l'exact opposé de la densité, alors la densité d'énergie sombre n'a pas non plus été constante dans le temps. On pourrait en savoir bientôt plus à ce sujet, car l'expérience *Euclid*, de l'Agence spatiale européenne, observera le passé de l'Univers, jusqu'à 10 milliards d'années en arrière. Son lancement est prévu au second semestre 2022.

Autre caractéristique propre à l'énergie sombre, elle serait décrite par un champ scalaire. Pour comprendre, un petit détour s'impose. La loi de la gravitation universelle énoncée par Newton enseigne que tout corps massif tombe vers le sol : cette propriété de la matière est due au champ gravitationnel créé par la Terre par lequel les corps pesants tombent vers les lieux où ce champ prend une valeur minimale. De même, un champ électrique accélère des particules chargées, tandis qu'un champ magnétique les met en rotation. Dans le premier cas, le champ gravitationnel est un scalaire, c'est-à-dire un nombre attribué en chaque point de l'espace comme peut l'être le champ de température qui nous renseigne sur la distribution de températures dans l'atmosphère. Les champs électriques et magnétiques sont, eux, des vecteurs, c'est-à-dire que, comme la vitesse d'un objet, ils sont définis par une direction et une intensité.

Le premier exemple de théorie de champ scalaire qui possède cette sensibilité à l'environnement et serait un candidat pour décrire l'énergie sombre date de 1939 et fut écrit par Markus Fierz et Wolfgang Pauli. Il a pour origine un tout autre problème et a resurgi il y a une dizaine d'années pour expliquer l'accélération de l'expansion de l'Univers. La relativité générale décrit la dynamique du champ gravitationnel ; mais en mécanique quantique, chaque champ est associé à une particule par la dualité onde-particule mise en avant par Niels Bohr. Il y a donc une particule qui accompagne la gravitation et se nomme le « graviton ». Il n'a jamais encore été observé expérimentalement, mais personne ne doute de son existence.

UNE MASSE POUR LE GRAVITON

Une de ses caractéristiques fondamentales est son absence de masse. Cette propriété étrange est intrinsèquement liée au fait que l'action de la gravitation a une portée infinie, c'est-à-dire que deux objets massifs, aussi éloignés

La gravitation massive porterait en elle une cinquième force entre objets massifs, qui viendrait en complément des quatre forces fondamentales. Ce serait une catastrophe

soient-ils l'un de l'autre, s'attirent toujours. Ainsi, la portée de l'interaction gravitationnelle est inversement proportionnelle à la masse du graviton, et, donc, une masse nulle implique une portée infinie. De la même manière, le photon, qui est la particule liée au champ électromagnétique, est aussi sans masse et la portée de la force électromagnétique est infinie.

Dans ce contexte, Fierz et Pauli se posèrent la question suivante : peut-on donner une masse au graviton ? Cela aurait une application directe sur la physique du cosmos. En effet, si la portée de l'interaction gravitationnelle était plus petite que la taille visible de l'Univers, alors les objets lointains seraient moins liés entre eux et apparaîtraient donc comme accélérés. La gravitation massive serait ainsi une théorie d'énergie sombre.

Mais ce n'est pas sa seule caractéristique. En effet, un graviton massif possède cinq polarisations, c'est-à-dire cinq états possibles. Le quantum de lumière, ou photon, n'en a que deux qui peuvent être séparées au laboratoire avec de simples filtres polarisants. Pour le graviton sans masse, il n'y a que deux polarisations comme le photon. De façon surprenante, l'une des trois polarisations supplémentaires du graviton massif correspond à un champ scalaire, et, comme nous l'avons déjà évoqué, ce champ est sensible à la présence de matière environnante. Malheureusement, il interagit avec elle de façon presque aussi forte que la gravitation.

La conséquence inévitable est que la gravitation massive porte en elle une cinquième force entre objets massifs, qui viendrait en complément des quatre forces fondamentales : électromagnétique, gravitationnelle et les deux forces nucléaires dites « fortes » et « faibles ». C'est une catastrophe, car l'existence d'une cinquième force est quasiment interdite par la physique des objets orbitant dans le Système solaire. Tellement que la gravitation massive semble, au premier abord, irrémédiablement exclue par l'expérience et envoyée aux oubliettes des idées brillantes, mais déconnectées du monde sensible.

À moins que… En 1972, Arkady Vainshtein a proposé un mécanisme qui réduit l'intensité de la cinquième force due au graviton massif. En effet, la théorie de Fierz-Pauli n'est pas une version complète de la gravitation massive. C'est une théorie linéaire, c'est-à-dire que le champ gravitationnel y est proportionnel à la quantité de matière qui le crée. Mais la relativité générale, c'est-à-dire la théorie décrivant le graviton sans masse, est non linéaire ; la relation de proportionnalité n'y est pas vérifiée. La théorie de la gravitation massive doit donc également être non linéaire. Quand Vainshtein inclut les premières corrections non linéaires à la théorie de Fierz-Pauli, il s'aperçut que celles-ci venaient modifier l'intensité de la cinquième force, laquelle disparaîtrait presque totalement en deçà d'une distance désormais connue sous le nom de « rayon de Vainshtein ». Dans le Système solaire, ce rayon est si grand qu'aucun effet de cinquième force ne peut se manifester. Cette propriété porte le nom d'« écrantage » et n'est pas sans rappeler l'effet d'une cage de Faraday, où le champ électromagnétique porté par la foudre ne peut pénétrer. Ici, c'est le champ scalaire de la gravitation massive qui ne pénétrerait pas dans le Système solaire, mais resterait actif aux échelles cosmologiques, où il serait à l'origine de l'accélération de l'expansion de l'Univers.

Malheureusement, une théorie complète de la gravitation massive reste encore à construire malgré les nombreux progrès depuis 2010.

Des enseignements peuvent être tirés de l'exemple précédent. D'abord, il est naturel qu'une théorie d'énergie sombre voie ses effets se transformer en une cinquième force dans le Système solaire. Pour éviter que cette théorie contredise ce qu'on sait du mouvement des objets orbitant dans le Système solaire, il est donc nécessaire que ses effets soient écrantés. De ce fait, l'énergie sombre peut jouer son rôle pleinement aux grandes échelles et être responsable de l'accélération de l'expansion de l'Univers tout en préservant les propriétés de la gravitation locale. Elle serait donc cachée dans notre environnement planétaire et solaire. Heureusement, il n'existe que quatre mécanismes d'écrantage, ce qui rend la physique de l'énergie sombre dans notre environnement relativement simple.

LE MÉCANISME DE CAMÉLÉON

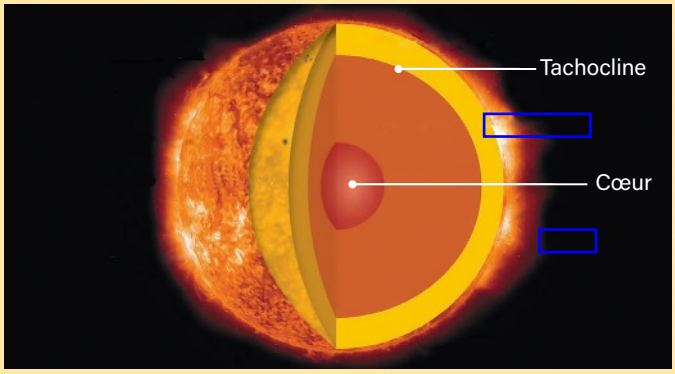
En plus du mécanisme de Vainshtein, une autre façon possible d'écranter un champ d'énergie sombre est le « mécanisme de caméléon ». Un caméléon serait un champ d'énergie sombre, associé à des « particules caméléons » (toujours cette particularité de la physique quantique), qui s'adapte à son environnement en devenant très massif dans la matière très dense. Il agirait même d'autant moins qu'il est massif ; la portée de son action serait alors si faible qu'un caméléon interagirait très peu avec la matière environnante et ne créerait que très peu d'effet de cinquième force. La force due au caméléon, exercée par le Soleil sur la Terre, serait ainsi minuscule. Cependant, une petite cinquième force serait suffisante pour influencer la distribution des galaxies de l'Univers. Cet effet sera aussi recherché par l'expérience *Euclid*.

Mais est-ce que cela signifie que l'énergie sombre n'a aucun effet local sur Terre ? Pas forcément, car l'écrantage de l'énergie sombre n'est jamais parfait. En particulier pour les modèles de caméléons, car pour les modèles avec écrantage à la Vainshtein, la cinquième force est écrantée jusqu'aux échelles cosmologiques. En revanche, un caméléon se laisserait détecter dans certaines expériences de grande précision sur Terre ou en orbite terrestre. La force due à un caméléon est ainsi activement recherchée dans les expériences testant la gravitation à très courte distance, sous l'échelle du dixième de millimètre.

Cette force est aussi un des enjeux de l'expérience *Microscope*, du Centre national d'études spatiales (Cnes), dont le satellite orbitant à 700 kilomètres de la Terre donne corps à l'expérience de pensée de Galilée depuis la tour de Pise. Au lieu d'un marteau et d'une plume, ce sont deux cylindres concentriques de titane et de platine, à bord du satellite, dont les chutes vers la Terre sont comparées. La différence d'accélération de ces corps est mesurée avec une précision d'un centième de milliers de… milliards ! À ce niveau de précision, la force caméléonique pourrait apparaître malgré l'écrantage qu'elle subit de la Terre et du satellite lui-même. Les premiers

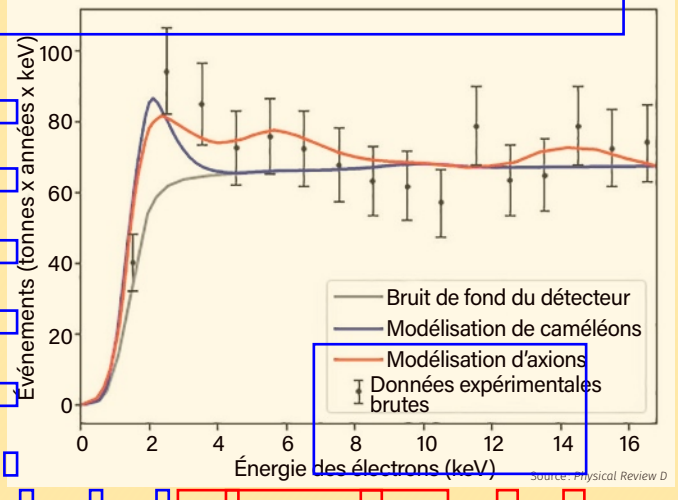
© Xenon collaboration

L'expérience *Xenon1T* de détection de matière noire *(ici, le détecteur avec ses tubes photomultiplicateurs)* a été conduite entre 2016 et 2018 dans le laboratoire souterrain de Gran Sasso, en Italie.



Des caméléons dans le Soleil ?

Dans l'expérience *Xenon1T*, lorsqu'une particule venait percuter l'un des atomes de xénon enfermés dans le conteneur, cela déclenchait un signal lumineux ou la circulation d'électrons libres, lesquels étaient enregistrés en continu. La plupart des interactions ont eu lieu avec des particules connues. Alors que 232 événements de ce type étaient attendus, 53 de plus ont été détectés. Cet excès a laissé penser que le dispositif avait capté des particules inconnues de matière noire nommées « axions », possiblement émises au cœur du Soleil.
En réalité, des axions émis dans les parties denses du Soleil entraîneraient une perte d'énergie catastrophique pour la stabilité de l'étoile. En revanche, il pourrait s'agir de champs caméléons, émis dans la tachocline solaire, beaucoup moins dense que le cœur du Soleil et où règne un fort champ magnétique favorable. Sur le graphique ci-dessous, la modélisation de l'action de ces caméléons *(courbe bleue)* colle plutôt bien avec les anomalies dépistées par *Xenon1T (barres verticales)*.

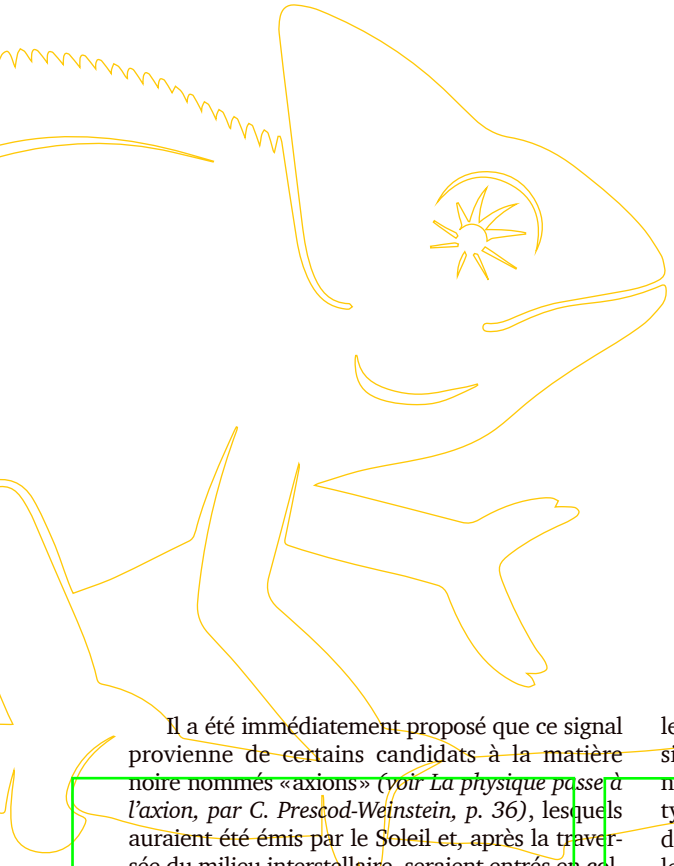


résultats n'ont pas mis en évidence le caméléon, mais les expériences satellitaires programmées après *Microscope* le pourront peut-être.

Une autre piste pour éclaircir le rôle de l'énergie sombre dans le Système solaire est venue d'une expérience en physique des particules. Depuis plusieurs décennies, le candidat le plus naturel pour décrire la matière noire, cette composante importante du contenu de l'Univers, est une particule très lourde. Sa masse serait plus d'une centaine de fois celle du proton et interagirait très faiblement avec la matière qui nous entoure. La Terre comme le reste de la Voie lactée devraient baigner dans un halo de matière noire composé de ces particules. Notre planète, dans son mouvement autour du Soleil, fendrait ce voile et il est probable qu'un détecteur bien calibré détecterait la collision entre un atome et l'une des particules de matière noire. Cette rencontre est très peu courante et son observation requiert d'enfouir ce détecteur et d'observer les possibles collisions pendant des années.

C'est ce qu'a fait l'expérience *Xenon1T* du laboratoire souterrain de Gran Sasso, en Italie. Dans un grand conteneur ont été placées 3,2 tonnes de xénon, un gaz rare en phase liquide. Une particule de matière noire peut ioniser le gaz et l'énergie des électrons récupérés peut être mesurée. Ainsi que cela a été publié en 2020, des électrons en excès ont été observés par rapport à ceux qui apparaissent naturellement dans le détecteur : 53 de plus que les 232 attendus. C'est trop pour être une simple fluctuation statistique avec une probabilité de plus de 99,5 %.

© ESA



Il a été immédiatement proposé que ce signal provienne de certains candidats à la matière noire nommés «axions» *(voir La physique passe à l'axion, par C. Prescod-Weinstein, p. 36)*, lesquels auraient été émis par le Soleil et, après la traversée du milieu interstellaire, seraient entrés en collision avec le xénon du détecteur à Gran Sasso. Malheureusement, ce scénario, qui ferait avancer la recherche sur la nature de la matière noire, est tout simplement impossible. En effet, de tels axions auraient réduit l'énergie emmagasinée par le Soleil de façon si considérable que notre étoile verrait sa durée de vie raccourcie drastiquement. Ceci est exclu. Il faut donc trouver autre chose.

DES CAMÉLÉONS NÉS DANS LE CHAMP MAGNÉTIQUE

L'énergie sombre est une explication possible : c'est ce que nous avons proposé récemment. En effet, les caméléons pourraient aussi être produits par le Soleil. Le mécanisme d'émission utiliserait leur couplage avec les photons et la présence d'un fort champ magnétique dans une région, la tachocline, située à une distance de 0,3 rayon solaire sous la surface du Soleil. Dans ce milieu où le champ magnétique atteindrait plusieurs dizaines de teslas, les caméléons produits s'échapperaient du Soleil et entreraient ensuite en collision avec le xénon à Grand Sasso.

Et si les caméléons étaient produits plus profondément, au cœur même du Soleil, comme possiblement les axions ? Impossible en raison du phénomène d'écrantage ! En effet, aux densités très grandes rencontrées à l'intérieur de notre étoile, proches de 150 fois celle de l'eau, les caméléons sont si massifs qu'ils sont impossibles à produire. Pour cette raison, aucun d'eux ne serait émis dans des étoiles plus massives du type géantes rouges. En revanche, la densité dans la tachocline est celle de l'eau liquide, et les caméléons y seraient assez légers pour naître dans le champ magnétique solaire. Leur production n'entraînerait pas une réduction spectaculaire de la durée de vie du Soleil.

De plus, le spectre en énergie des caméléons solaires pourrait être l'explication de la mesure effectuée par l'expérience *Xenon (voir l'encadré p. 118)*. En effet, il n'y a que 5 % de chance pour qu'un bruit dans le détecteur soit une meilleure explication que le caméléon. C'est un pourcentage faible, mais encore insuffisant pour affirmer que l'énergie sombre a été détectée. Les expériences programmées comme *Xenon10T*, contenant davantage de xénon dans son réservoir, nous aideront à affiner notre hypothèse et à débusquer une énergie sombre aux étonnantes capacités de camouflage.

— L'auteur —

> Philippe Brax
est physicien à l'institut de physique théorique (Université Paris-Saclay/CNRS/CEA).

— À lire —

> Sunny Vagnozzi *et al.*, Direct detection of dark energy: The Xenon1T excess and future prospects, *Phys. Rev. D*, vol. 104, 2021.

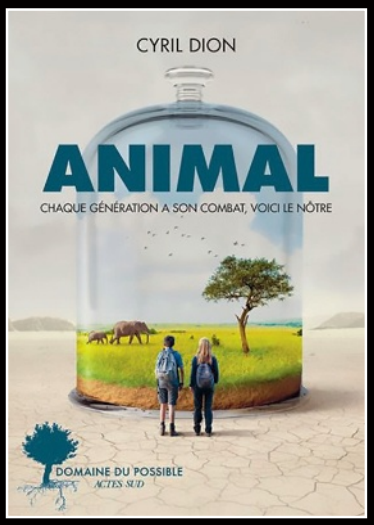
> E. Aprile *et al.*, Excess electronic recoil events in Xenon1T, *Phys. Rev. D*, vol. 102, 2020.

À LIRE

Sauver la planète !

Une série d'entretiens avec des spécialistes aide à retisser les liens avec la biodiversité à l'heure de la sixième grande extinction de masse.

La primatologue Jane Goodall, l'anthropologue Philippe Descola, le philosophe Baptiste Morizot, l'économiste Éloi Laurent, la militante Claire Nouvian, la juriste Valérie Cabanes, et bien d'autres encore. Ils en ont de la chance Bella Lack et Vipular Puvaneswaran, deux adolescents engagés pour la cause animale et climatique, d'avoir rencontré ces spécialistes qui cherchent à comprendre pourquoi les espèces disparaissent, pourquoi le climat se dérègle et, surtout, comment inverser la tendance. Ces rencontres ont eu lieu sous la houlette de Cyril Dion à l'occasion du tournage de son dernier documentaire, sur les écrans depuis le 1er décembre 2021. Les entretiens, plus approfondis qu'ils n'apparaissent dans le film, sont retranscrits dans cet ouvrage. Et l'on découvre comment fonctionnent les lobbys au Parlement européen, comment certains éleveurs sont pris au piège d'un système de production intensive qui ne leur laisse aucune échappatoire, pourquoi les indicateurs de la croissance liés au PIB sont obsolètes et inopérants, comment faire cohabiter les loups, les pumas et les humains, comment les Indiens brörán du Costa Rica ont reconstitué des forêts en moins de quarante ans… À première vue disparates, ces histoires se rejoignent en ce qu'elles appellent à écrire un nouveau récit, une nouvelle histoire où l'humanité et la nature ne seront plus opposées, mais réunies pour le bien des deux. Un mode d'emploi pour habiter cette planète différemment.



Cyril Dion et Nelly Pons
Animal,
Actes Sud, 2021
448 pages, 20 euros

À VOIR

L'évolution en lumière

Hallucigenia, *ichthyostega*, *helicoprion*… cela ressemble à la table des matières d'un manuel sur l'évolution, mais il s'agit de quelques exemples d'espèces mises en lumière dans « L'évolution en voie d'illumination », une déambulation nocturne spectaculaire proposée par le Muséum national d'histoire naturelle, à Paris, dans le jardin des plantes. Un voyage dans le temps de 600 millions d'années au gré de plus d'une centaine de structures lumineuses monumentales inspirées du savoir-faire traditionnel des lanternes chinoises. Émerveillement garanti ! Dépêchez-vous, l'extinction des feux est prévue le 30 janvier…

https://bit.ly/2ZZSGNS

À EXPLORER

L'Univers en réalité virtuelle

Embarquement immédiat pour un voyage immersif à travers l'Univers grâce à Virup, le logiciel *open source* mis au point par l'EPFL, à Lausanne. Installé sur votre ordinateur, il vous donne accès, avec un casque de réalité virtuelle, à un ensemble gigantesque de données (Sloan Digital Sky Survey, Gaia, Planck, l'Open Exoplanet Catalog…) mises en scène. De la sorte, on visite l'espace à différentes échelles, du voisinage de la Terre jusqu'à l'Univers dans son ensemble sur la base des plus récentes informations. Vertigineux !

https://arxiv.org/abs/2110.04308

© L. Mangin

À VISITER

Un appel à déconner !

Au milieu du XXe siècle, un établissement psychiatrique brise les conventions et devient un haut lieu du soin, de l'art et de la résistance.

On le sait peu, mais la psychiatrie a connu un tournant majeur à Saint-Alban-sur-Limagnole, en Lozère. Une exposition à Toulouse, aux Abattoirs, se charge de nous rafraîchir la mémoire en retraçant la vie de l'Espagnol François Tosquelles. Ce dernier, fuyant le régime de Franco, s'est réfugié pendant la Seconde Guerre mondiale dans le sud de la France et y a fondé un asile où les règles de vie et de soin étaient particulièrement novatrices pour l'époque. Là, dans un environnement favorable, dénué de toute répression, à l'inverse d'autres établissements, les patients sont responsabilisés, humanisés et encouragés à s'exprimer comme ils l'entendent. Et certains s'y adonnent avec passion ! L'endroit devient un carrefour où se croisent artistes, résistants, médecins avant-gardistes… Ainsi, en 1945, Jean Dubuffet y développe son idée d'art brut, c'est-à-dire « indemne de culture » et collectionne plusieurs créations de Saint-Alban. Paul Éluard et Tristan Tzara y sont passés, tandis que, côté praticiens, Franz Fanon s'y est formé. Les visiteurs sont tout le long du parcours invités à interroger l'idée de

François Tosquelles brandissant un bateau d'Auguste Forestier, l'un de ses patients.

© P. Ruiz

l'« autre », de « malade », de l'« indésirable »… et surtout à célébrer selon Tosquelles ce « droit au vagabondage du corps et de l'esprit » en appelant les patients à « déconner » !

« La Déconniatrie : art, exil et psychiatrie autour de François Tosquelles », aux Abattoirs, à Toulouse, jusqu'au 6 mars 2022.

www.lesabattoirs.org

À DÉGUSTER

Bon appétit !

Classé au patrimoine culturel immatériel de l'humanité par l'Unesco, le « repas gastronomique des Français » est au cœur de l'exposition « Banquet », proposée par la Cité des sciences et de l'industrie, à Paris. Entre cuisine et laboratoire, le visiteur découvre d'abord les matières premières, les gestes, les ustensiles, la préparation, des associations gustatives inédites, les secrets de plats signatures de grands chefs, notamment le fameux coulant au chocolat de Michel Bras… Vient ensuite l'exploration des sens qui contribuent au goût, avec des expériences déroutantes, des défis posés à notre perception (par exemple, l'influence de la couleur sur le goût perçu), et même un projet de science participative mené par l'Inrae, où il est question d'évaluer saveurs et arômes de deux carrés de chocolat. Le parcours se termine par une mise en contexte historique de l'idée de banquet en France et dans le monde, et, enfin, un spectaculaire dîner-spectacle virtuel mêlant arts visuels, musique, technologies multimédias pour une apothéose festive. Tout est fait, comme le dit Bruno Maquart, président d'Universcience, « pour le plus grand plaisir de vos papilles comme celui de vos neurones. »

« Banquet », à la Cité des sciences et de l'industrie, à Paris, jusqu'au 7 août 2022. https://bit.ly/3dtiO72

Pour la Science HORS-SÉRIE

WWW.POURLASCIENCE.FR
170 bis bd du Montparnasse
75014 Paris
Tél. : 01 55 42 84 00

GROUPE POUR LA SCIENCE
Directrice des rédactions : Cécile Lestienne

HORS-SÉRIE POUR LA SCIENCE
Rédacteur en chef adjoint : Loïc Mangin
Rédacteur en chef adjoint délégué : Olivier Voizeux
Maquettiste : Ghislaine Salmon-Legagneur

POUR LA SCIENCE
Rédacteur en chef : Maurice Mashaal
Rédactrice en chef adjointe : Marie-Neige Cordonnier
Rédacteurs : François Savatier, Sean Bailly

Développement numérique : Philippe Ribeau-Gésippe
Community manager et partenariats : Aëla Keryhuel
aela.keryhuel@pourlascience.fr

Conception graphique : Céline Lapert et Ingrid Leroy
Direction artistique : Céline Lapert
Maquette : Pauline Bilbault, Raphaël Queruel, Ingrid Leroy et Ingrid Lhande
Réviseuse : Anne-Rozenn Jouble
Marketing & diffusion : Charline Buché
Cheffe de produit : Eléna Delanne
Direction du personnel : Olivia Le Prévost
Secrétaire général : Nicolas Bréon
Fabrication : Marianne Sigogne et Zoé Farré-Vilalta
Directeur de la publication et gérant : Frédéric Mériot
Ont contribué à ce numéro : Nicolas Arnaud, Maud Bruguière, Capucine Jahan, Christophe Pichon, William Rowe-Pirra

PUBLICITÉ FRANCE
stephanie.jullien@pourlascience.fr

ABONNEMENTS
Abonnement en ligne :
https://boutique.groupepourlascience.fr
Courriel : serviceclients@groupepourlascience.fr
Tél. : 01 86 70 01 76
Du lundi au vendredi de 9 h à 13 h
Adresse postale :
Service Abonnement - Groupe Pour la Science
235 avenue Le Jour se Lève
92100 Boulogne-Billancourt

Tarifs d'abonnement 1 an (12 numéros)
France métropolitaine : 59 euros
Europe : 71 euros
Reste du monde : 85,25 euros

DIFFUSION
Contact kiosques :
À Juste Titres ; Alicia Abadie
Tél. : 04 88 15 12 47
Information/modification de service/réassort :
www.direct-editeurs.fr

SCIENTIFIC AMERICAN
Editor in chief : Laura Helmuth
Acting President : Stephen Pincock
Executive Vice President : Michael Florek

Toutes demandes d'autorisation de reproduire, pour le public français ou francophone, les textes, les photos, les dessins ou les documents contenus dans la revue « Pour la Science », dans la revue « Scientific American », dans les livres édités par « Pour la Science » doivent être adressées par écrit à « Pour la Science S.A.R.L. », 162 rue du Faubourg Saint-Denis, 75010 Paris.
© Pour la Science S.A.R.L. Tous droits de reproduction, de traduction, d'adaptation et de représentation réservés pour tous les pays.
La marque et le nom commercial « Scientific American » sont la propriété de Scientific American, Inc. Licence accordée à « Pour la Science S.A.R.L. ».
En application de la loi du 11 mars 1957, il est interdit de reproduire intégralement ou partiellement la présente revue sans autorisation de l'éditeur ou du Centre français de l'exploitation du droit de copie (20 rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).

Origine du papier : Finlande • Taux de fibres recyclées : 0 % • « Eutrophisation » ou « Impact sur l'eau » : P_{tot} 0,003 kg/t

PEFC 10-31-1282 / Certifié PEFC / Ce produit est issu de forêts gérées durablement et de sources contrôlées. / pefc-france.org

Imprimé en France – Maury imprimeur S.A. Malesherbes – N° d'imprimeur : 259 375 – N° d'édition : M0770712-01 – Dépôt légal : janvier 2022.
Commission paritaire n° 0922K82079 du 19-09-02 – Distribution : MLP – ISSN 1 246-7685 – Directeur de la publication et gérant : Frédéric Mériot.

Institut du Cerveau ICM

BRAINCAST

La voix des neurones

Le podcast de *Cerveau & Psycho*

en partenariat avec l'Institut du Cerveau

8ème épisode

Comment notre cerveau détermine nos choix alimentaires

www.cerveauetpsycho.fr/sr/braincast/

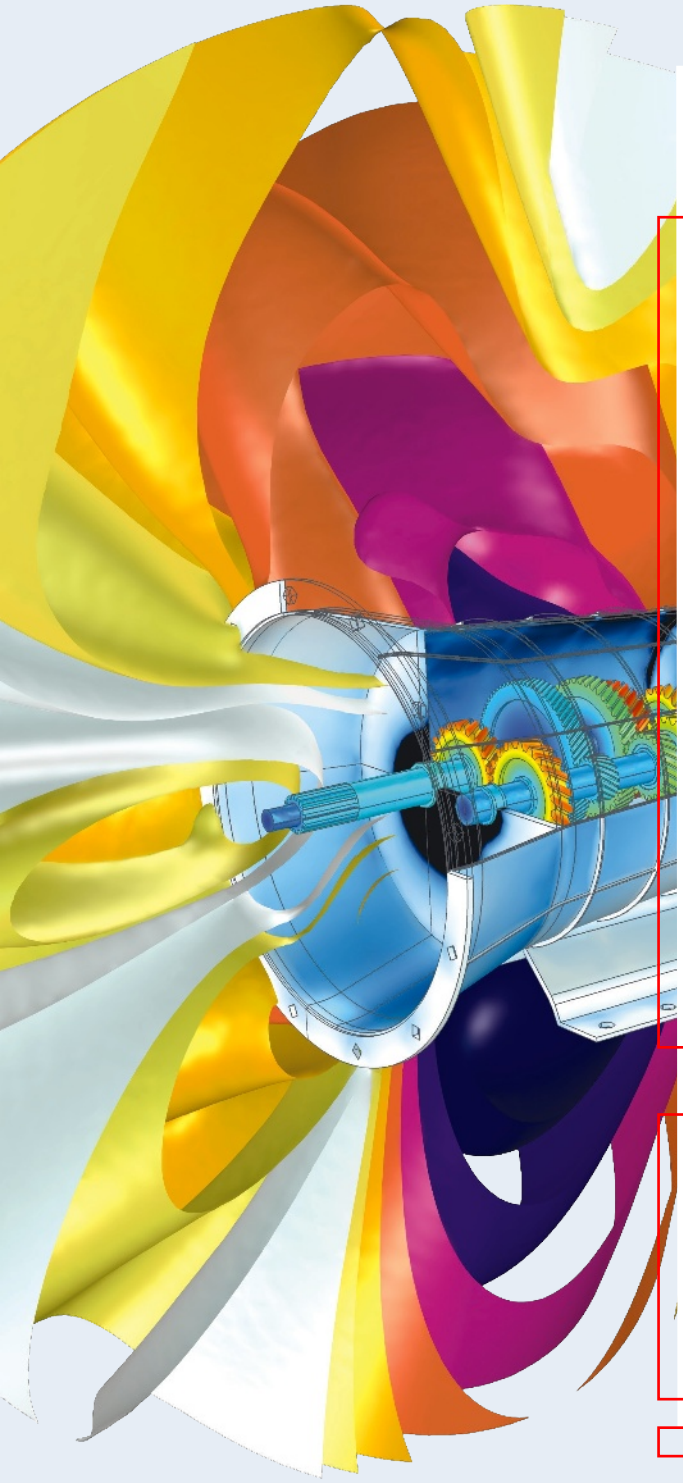
8ème épisode

avec la Dr Liane Schmidt

interviewée par Sébastien Bohler

Chercheuse en neurosciences cognitives

Cerveau & Psycho



ÉTUDE DE CAS

Des simulations de tests de bruits et vibrations que vous pouvez voir et entendre !

L'approche la plus efficace pour réduire le rayonnement sonore d'une boîte de vitesses consiste à effectuer une analyse vibro-acoustique pour savoir comment en améliorer la conception. Les essais de bruits, vibrations (NVH) sont une partie importante du processus de conception et peuvent être simulés avec un logiciel multiphysique.

EN SAVOIR PLUS *comsol.blog/NVH-simulation*

COMSOL

Le logiciel COMSOL Multiphysics® est utilisé pour la conception et la simulation des dispositifs et des procédés dans tous les domaines de l'ingénierie, de la fabrication et de la recherche.