

neutrino

la particule qui façonne

l'univers

Raymond Davis, Prix Nobel de physique en 2002, avait cherché pendant trente ans pourquoi il ne détectait qu'un tiers des neutrinos formés par les réactions nucléaires du centre du Soleil. Nous savons depuis 1998 que ce n'était pas seulement à cause des faibles interactions de ces particules avec la matière. La preuve a été apportée que les neutrinos se transforment spontanément lorsqu'ils se propagent. Aujourd'hui, ce n'est pas un détail pour les physiciens. Ces « oscillations » et leur corollaire, l'existence d'une masse pour les neutrinos, seraient les principales causes de la prédominance de la matière sur l'antimatière. Par ailleurs, certains neutrinos massifs constitueraient la matière noire, qui compose 85 % de la masse de l'Univers. Enfin, un flux de neutrinos « primordiaux » porte jusqu'à nous de précieuses informations sur le Big Bang. En 1930, Wolfgang Pauli avait lancé : « J'ai fait une chose terrible. J'ai postulé l'existence d'une particule qui ne peut être détectée. » Finalement, il avait bien fait.

1 Retrouvera-t-on l'antimatière ? p. 31

3 Particule de matière noire p. 40

2 Le tour du monde des expériences p. 38

4 Invisible témoin du Big Bang p. 43

EN DEUX MOTS Contrairement à ce que les physiciens pensaient depuis les années 1930, les « neutrinos », particules produites au cœur des étoiles, ont bel et bien une masse !

Celle-ci est infime, mais suffisante pour qu'ils se transforment d'un type à un autre au cours du temps. Ce phénomène permettrait à une interaction fondamentale de la physique de

différencier les neutrinos de leurs équivalents d'antimatière, et ce faisant d'expliquer pourquoi notre Univers est constitué de matière plutôt que d'antimatière.

1 Retrouvera-t-on l'antimatière ?

Comment la matière a-t-elle pris le pas sur l'antimatière dans l'Univers primordial? Cela fait cinquante ans que les physiciens se posent la question. Ils sont aujourd'hui convaincus que les propriétés des neutrinos permettront enfin de répondre.

Jean Orloff est professeur au laboratoire de physique corpusculaire de l'université Blaise-Pascal, à Clermont-Ferrand.
orloff@in2p3.fr

La montagne du Gran Sasso, dans les environs de Rome, abrite le plus grand laboratoire souterrain de physique des particules. À 1 400 mètres de profondeur, se trouve un gigantesque détecteur, pesant près de 2 000 tonnes. Depuis septembre 2006, il enregistre la présence de particules appelées « neutrinos », émises sur 732 kilomètres, à travers la croûte terrestre, par les installations du laboratoire européen de physique des hautes énergies, le CERN, près de Genève. Baptisée « Opera » pour « Oscillation Project with Emulsion-tRacking Apparatus », l'expérience vise à mieux comprendre le comportement de ces particules, parmi les plus nombreuses dans l'Univers. Leur étude est particulièrement difficile car elles interagissent très peu avec la matière. Si peu que les neutrinos sont souvent dénommés « particules fantômes ». À ce jour, leurs propriétés constituent néanmoins la piste la plus crédible pour résoudre un problème fondamental en cosmologie. Le Big Bang aurait créé autant de matière que d'antimatière. Or, l'antimatière est quasi absente de notre Univers. Comment la matière a-t-elle pris le pas sur

l'antimatière? Une question qui revient à se demander pourquoi, aujourd'hui, existe-t-il quelque chose plutôt que rien...

L'origine du concept d'antimatière remonte à la fin des années 1920. Paul Dirac, de l'université de Cambridge, réussit alors à concilier la mécanique quantique et la théorie de la relativité restreinte [1]. Or, appliquées à l'électron, les équations de Dirac ont deux solutions : l'une correspondant à une énergie positive, l'autre négative. D'un point de vue physique, avance le physicien britannique, la seconde correspondrait à des particules possédant une énergie positive, mais une charge électrique opposée à celle de l'électron. En somme, des « antiélectrons ».

Les moqueries de Niels Bohr

La communauté scientifique est plutôt dubitative. L'interprétation de Dirac suscite même les moqueries de Niels Bohr, l'un des « pères » de la mécanique quantique. Qui ne dureront pas ! Car en 1932 Carl Anderson constate que les rayons cosmiques produisent des électrons, mais aussi des particules de même masse et de charge opposée, très vite ➔

[1] P. Dirac., *Proc. Roy. Soc., A 117*, 610, 1928.

[2] C. Anderson, *Science*, 76, 238, 1932.

[3] O. Chamberlain *et al.*, *Phys. Rev.*, 100, 947, 1955.

[4] C. Wu *et al.*, *Phys. Rev.*, 105, 1413, 1957.

⇒ identifiées aux antiélectrons de Dirac [2]. Par ailleurs, électrons et antiélectrons s'annihilent en se rencontrant, ce qui entraîne l'émission d'au moins une paire de photons.

Opération de symétrie

Dans les années 1950, les expériences d'Emilio Segrè, d'Owen Chamberlain et de Bruce Cork permettent de généraliser l'existence de l'antimatière. Au laboratoire Lawrence, à Berkeley, en Californie, ils découvrent l'antiproton puis l'antineutron, antiparticules du proton et du neutron qui constituent les noyaux atomiques [3]. Les équations de Dirac étant valables pour toutes les particules de matière, ces résultats confortent l'idée que l'inversion de la charge (appelée « conjugaison de charge », et notée « C ») pourrait être une symétrie caractéristique de notre Univers. Il serait alors impossible de distinguer un monde d'un « antimonde » sans les mettre en contact, ce qui entraînerait leur annihilation.

Pas de risque de ce genre dans l'Univers actuel, où l'antimatière n'est présente qu'en infime quantité. Sur Terre, elle est produite dans les accélérateurs de particules, et le petit nombre d'antiparticules venant de l'espace s'annihile rapidement dans l'atmosphère. Mais les théories cosmologiques avancent qu'il n'en a pas toujours été ainsi.

Remontons, en effet, dans le passé de notre Univers en expansion. Cela revient à faire subir à celui-ci une compression qui élève sa température. Lorsque l'on remonte le temps, donc, l'énergie des particules augmente progressivement, entraînant des collisions de plus en plus violentes. Ces collisions commencent par

supprimer l'effet de la force gravitationnelle, qui lie les atomes des planètes à ceux des étoiles. Puis, à environ 1 400 kelvins, elles brisent le lien électromagnétique entre les électrons et les protons. À une dizaine de milliards de kelvins, elles détruisent les liens entre les protons et les neutrons dans les noyaux. À deux mille milliards de kelvins, les quarks, constituants élémentaires des protons et des neutrons, sont à leur tour libérés. Au-delà, l'énergie des collisions entre les quarks est telle qu'elle entraîne une production de plus en plus nombreuse de paires de quarks et d'antiquarks, leurs équivalents d'antimatière.

Ces conditions sont celles de l'Univers primordial, qui aurait alors contenu autant d'antimatière que de matière... avec toutefois un léger excès pour la dernière: sinon, matière et antimatière se seraient totalement annihilées, laissant place, aujourd'hui, à un morne gaz de photons. On chiffre cet excédent par le « nombre baryonique net » (les baryons sont

une famille de particules lourdes, dont les neutrons et les protons sont les principaux représentants). Il est déterminé en « pesant » la quantité de matière présente actuel-

lement dans l'Univers. Les calculs montrent que dans l'Univers primordial, pour un milliard d'antiquarks, il devait y avoir un milliard de quarks plus un. Pas deux, ni trois quarks de plus, sans quoi il y aurait deux ou trois fois trop de matière survivante aujourd'hui.

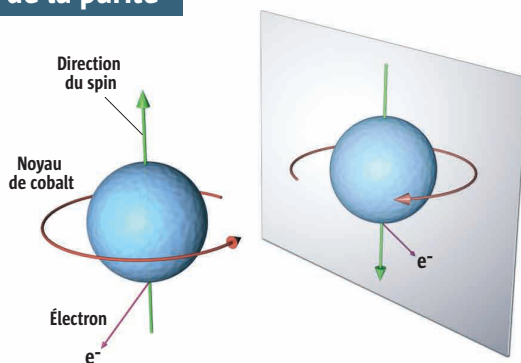
Quels mécanismes ont permis d'ajuster cette infime, mais indispensable asymétrie? Au milieu des années 1950, Tsung-Dao Lee, de l'université Columbia, et Chen Ning Yang, de l'Institut des études avancées de Princeton, apportent un premier élément de réponse. Pour eux, la force faible, interaction fondamentale de la physique, violerait la symétrie de « parité » (notée « P »), opération qui consiste à inverser l'un des axes des coordonnées de l'espace. Cette hypothèse rencontre un intérêt mitigé chez les physiciens: pour quelle raison l'Univers ne serait-il pas identique à son image dans un miroir?

Pour répondre, Lee convainc sa collègue Chien-Shiung Wu de réaliser une expérience. En analysant la désintégration d'un noyau de cobalt, dont l'interaction faible est responsable, elle montre, en 1957, que des électrons sont émis préférentiellement dans une direction de l'espace: en l'occurrence, la direction opposée à celle du « spin » du noyau, propriété quantique apparentée à la rotation des particules sur elles-mêmes [4]. L'interprétation qui en découle est que, contrairement aux autres forces – la gravitation, les interactions fortes et électromagnétiques –, la force faible est insensible aux particules qui avancent dans une direction

Dans l'Univers actuel, l'antimatière n'est présente qu'en infime quantité

Fig.1 Violation de la parité

LA DÉSINTÉGRATION D'UN NOYAU DE COBALT (en bleu) produit un électron, émis préférentiellement dans une direction opposée à celle du spin (flèche verte). En regardant l'image de cette désintégration dans un miroir (schéma de droite), l'électron se retrouve alors émis dans la même direction que le spin: la symétrie de parité, qui consiste ici à inverser l'un des axes des coordonnées spatiales, n'est pas respectée. © INFOGRAPHIE BRUNO BOURGEOIS



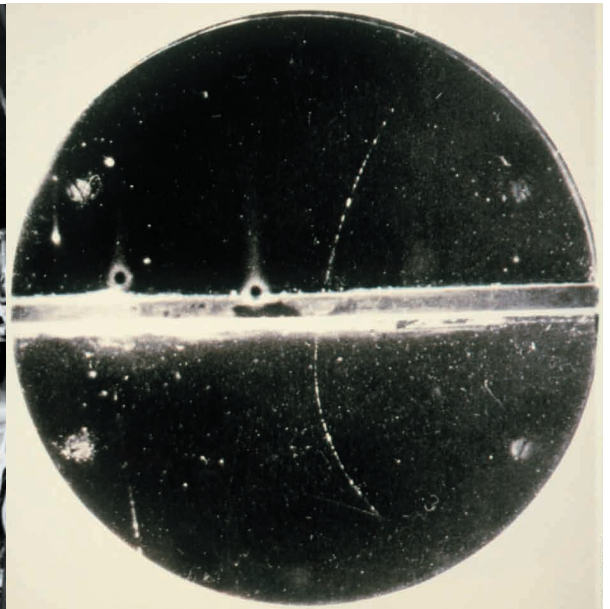
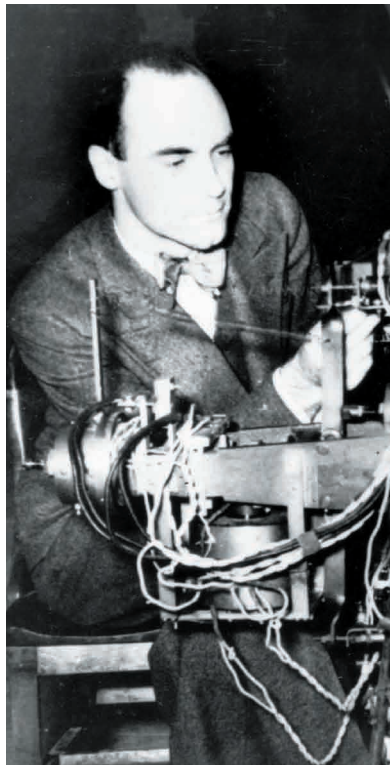
opposée à celle de leur spin. Dans ce cas, on dit que ces particules possèdent une «hélicité» positive, ou «droite»; sinon, l'hélicité est négative, ou «gauche», et les particules interagissent avec la force faible. Les physiciens se rassurent un temps en montrant que la symétrie qui doit être respectée n'est pas celle de C ou de P mais de leur produit «CP», opération consistant à inverser la charge et les coordonnées spatiales. La force faible permettrait de faire la différence entre notre monde et son «antimonde» conjugué par C, mais pas avec son antimonde conjugué par CP, qui transforme des particules «gauches» en antiparticules «droites».

Les quarks oscillent

Mais en 1964 nouveau rebondissement. Au laboratoire de Brookhaven, près de New York, une équipe internationale observe une violation de CP lors de la désintégration d'une particule exotique appelée «méson K» [5]. Celle-ci peut exister sous deux états physiques. Si la symétrie CP est respectée, le premier état se désintègre rapidement en deux particules, et le deuxième se désintègre beaucoup plus lentement en trois particules. Or, dans un faisceau de mésons K, les physiciens continuent d'observer des processus de désintégration en deux particules après le temps de vie du premier état. Leur nombre est infime, mais preuve est faite que les lois de la nature font la différence entre matière et antimatière.

Dans le sillage de cette découverte, les recherches se multiplient afin de comprendre les mécanismes permettant à la matière de prédominer. Les théoriciens se mobilisent, tel le Soviétique et futur Prix Nobel de la paix Andreï Sakharov. En 1967, il présente un modèle réunissant trois conditions nécessaires à l'apparition d'un univers dominé par la matière : une période de violent déséquilibre thermodynamique ; une interaction modifiant le nombre baryonique ; enfin, la violation de CP, dont l'origine demeure mystérieuse.

La compréhension de cette violation progresse parallèlement aux connaissances sur les quarks. En 1973, en effet, les Japonais Makoto Kobayashi et Toshihide Maskawa montrent qu'une nouvelle théorie appelée aujourd'hui «Modèle standard de la physique des particules», qui décrit les particules élémentaires et les forces régissant leurs interactions, permet la violation de CP [6]. Pour cela, il faut qu'il existe au moins trois familles de quarks, chacune comprenant deux types de



CARL ANDERSON (à gauche) observe, en 1932, la première particule d'antimatière. Sa masse est identique à celle de l'électron mais sa charge est inversée, comme le montre la déviation de l'antiparticule dans un champ magnétique (arc de cercle ci-dessus). © S.S.P.L./COSMOS - ANDERSEN CARL/S.P.L./COSMOS

quarks de charge différente. Ceux-ci interagissent *via* la force faible, mais entre deux interactions ils peuvent se transformer, ou «osciller», d'une famille à l'autre. Cette violation ne s'exprime que dans des processus combinant oscillations et interactions, comme lors de la désintégration des mésons K.

Quatre ans plus tard, leurs travaux sont couronnés de succès avec la découverte, au Fermilab, près de Chicago, d'un représentant de la troisième famille de quarks, le quark «bottom». Commence alors la traque de la violation de CP dans d'autres systèmes, notamment au sein de particules contenant le quark bottom. Stimulés par les travaux de Sakharov, les théoriciens planchent pour leur part sur un mécanisme modifiant le nombre baryonique. Vers le milieu des années 1980, Vadim Kuzmin, Valery Rubakov et Mikhail Shaposhnikov, de l'Institut de recherches nucléaires de Moscou, montrent que, pour des températures supérieures à un million de milliards de kelvins, des processus dits «anomaux»* peuvent transformer des quarks d'hélicité gauche en d'autres particules (appelées «leptons»), qui ne rentrent pas dans le décompte du nombre baryonique net [7].

Forts de ces succès, certains physiciens pensent que l'énigme de l'antimatière est en passe d'être résolue! D'un point de vue qualitatif, le Modèle standard réunit en effet les éléments nécessaires à l'apparition d'une asymétrie. En 1992, Mikhail Shaposhnikov propose un modèle quantitatif, et montre que la désactivation des processus anomaux impose une ⇒

* Les **processus anomaux** sont des phénomènes purement quantiques qui n'ont pas de prolongement dans le monde macroscopique.

[5] J. Christenson *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, 13, 138, 1964.

[6] M. Kobayashi et T. Maskawa, *T. Prog., Theor. Phys.*, 49, 652, 1973.

[7] V. Kuzmin *et al.*, *Phys. Lett.* 155 B, 36, 1985.

[8] M. Shaposhnikov, *Phys. Lett. B*, 277, 324, 1992.

[9] M. Gavela *et al.*, *Mod. Phys. Lett.*, A9, 795, 1994.

[10] C. Cowan *et al.*, *Science*, 124, 103, 1956.

⇒ limite supérieure à la masse du « boson de Higgs », chaînon manquant du Modèle standard sans lequel les particules n'auraient pas de masse [8]. Mais une série de résultats douchent bientôt cet enthousiasme. Tout d'abord, la recherche du boson de Higgs repousse progressivement sa masse au-delà de la limite définie par Shaposhnikov. En outre, la violation de CP observée dans les particules constituées de quarks n'explique pas l'asymétrie entre matière et antimatière. En 1993, Belèn Gavela, Pilar Hernandez, Olivier Pène et moi-même en avons déterminé la raison : à très hautes températures, les interactions fortes détruisent la cohérence quantique nécessaire à l'oscillation des quarks, ce qui limite les effets de la violation de CP à une quantité dix milliards de fois inférieure à celle de l'asymétrie originelle [9].

Celle-ci était un trop petit nombre pour correspondre, naturellement, aux caractéristiques de l'Univers primordial, mais elle est encore trop grande pour s'expliquer dynamiquement dans le Modèle standard. Un ingrédient doit y être ajouté pour obtenir une asymétrie suffisante. Pour cela, le neutrino est le meilleur candidat, et les découvertes récentes sur ses propriétés mettront rapidement les physiciens sur cette nouvelle piste.

L'existence de cette particule a été proposée en 1930 par le physicien autrichien Wolfgang Pauli, afin d'expliquer la disparition d'énergie lors de la désintégration du neutron (lire « La carte d'identité des neutrinos », p. 35). L'hypothèse d'un « invisible » porteur d'énergie est alors théoriquement satisfaisante, mais, par essence, très difficile à vérifier. Plus précisément,

Il a fallu attendre plus de vingt ans pour qu'un neutrino soit détecté

l'Américain Hans Bethe montre en 1934 que la probabilité d'interaction d'un neutrino avec la matière doit être extrêmement faible : des milliards de milliards de fois moins importante que celle de l'électron.

La détection des neutrinos constitue ainsi une gageure (lire « Détecter l'insaisissable », p. 36). Il faudra d'ailleurs attendre plus d'une vingtaine d'années pour qu'un neutrino soit détecté par Clyde Cowan et Frederick Reines, près du réacteur nucléaire de Savannah River, aux États-Unis [10]. Trois types seront par la suite identifiés : le neutrino de l'« électron »,

du « muon » et du « tau », ainsi dénommés car toujours émis avec les particules (des leptons chargés) portant ces noms.

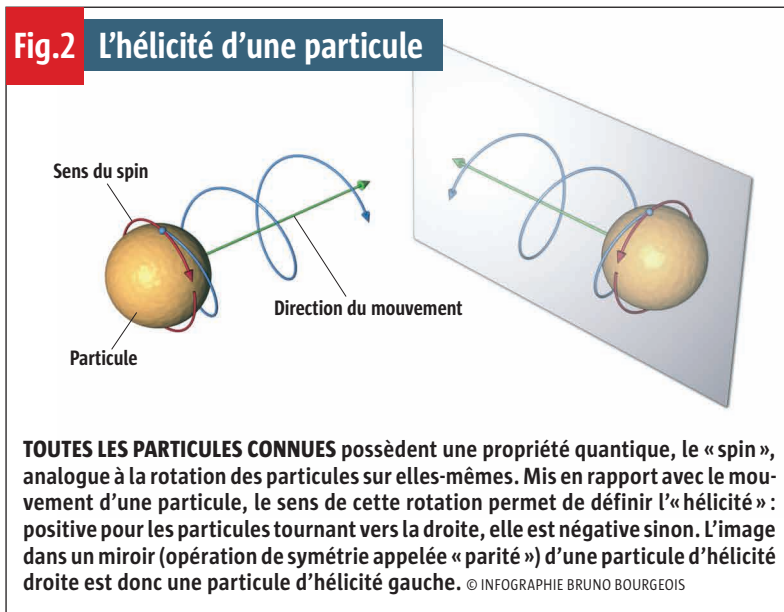
Au sein du Modèle standard, les neutrinos n'ont pas de

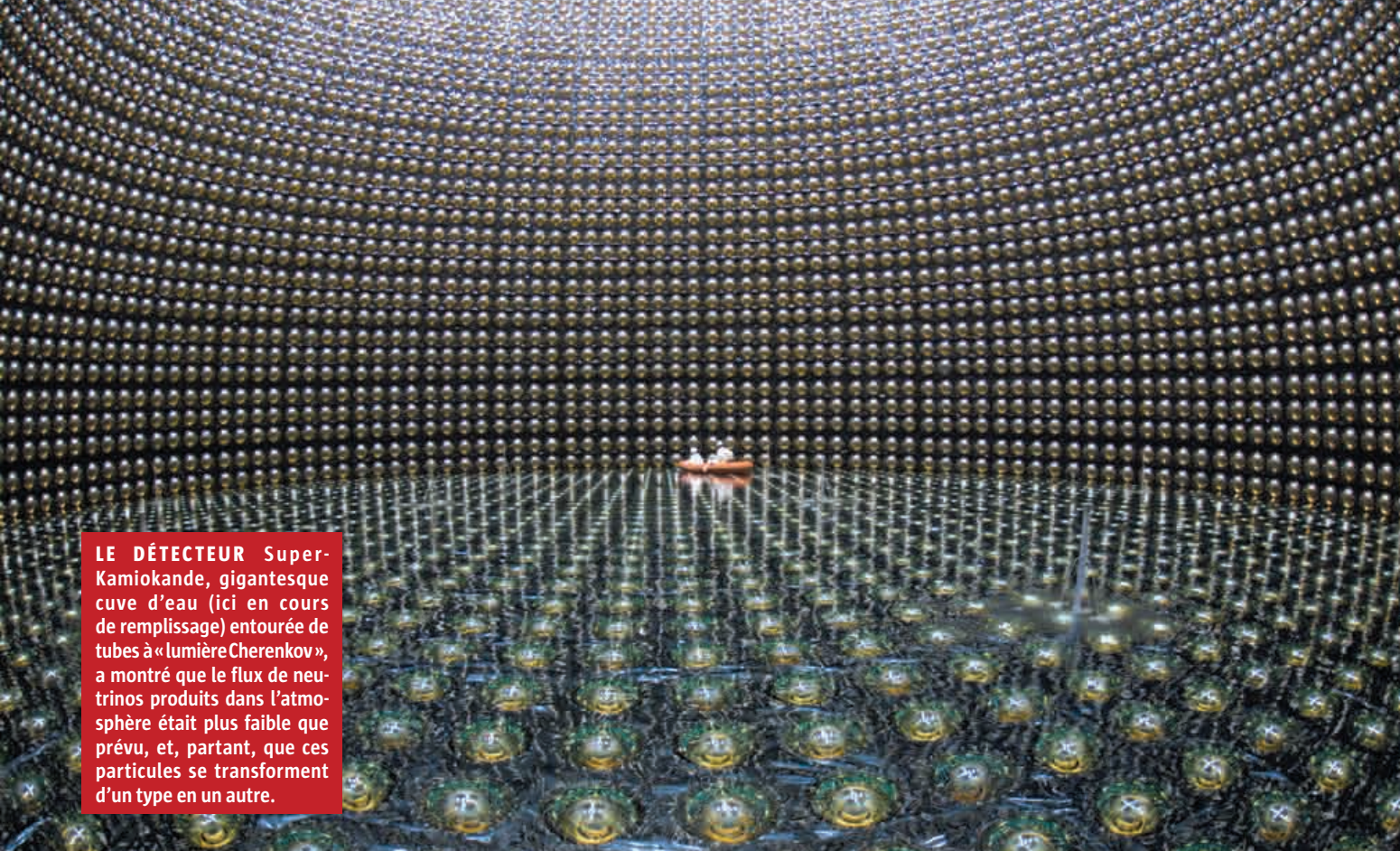
masse. Cette caractéristique répond à un principe d'économie, car elle simplifie les équations de Dirac sur les propriétés des neutrinos et des antineutrinos. En outre, depuis 1958, les mesures de l'hélicité des neutrinos montrent invariablement que celle-ci vaut $-1/2$. Or, le signe de l'hélicité devrait varier si les neutrinos étaient massifs. Dans un Modèle standard « minimal », le neutrino n'a ainsi pas de masse. Il est néanmoins possible qu'elle soit si faible que ses effets sur les mesures d'hélicité deviennent négligeables.

Fusion nucléaire

Il faudra toute la persévérance d'expérimentateurs comme Raymond Davis pour faire évoluer les idées sur la masse des neutrinos. En 1968, ce dernier dirige la construction d'une cuve remplie de 600 tonnes d'un solvant riche en chlore. Ce faisant, il espère détecter les neutrinos électroniques émis par le Soleil lors des réactions de fusion. En traversant la cuve, ces neutrinos transforment quelques atomes de chlore en argon. La cuve est placée sous 2 300 mètres de roches, dans la mine de Homestake, aux États-Unis, afin que les rayons cosmiques ne biaisent pas les mesures. Celles-ci n'en seront pas moins surprenantes. En effet, seul un tiers des neutrinos prévus est détecté. La prédiction de ce nombre, qui est fondée sur une estimation des réactions de fusion, est-elle trop importante ? L'extraction des atomes d'argon est-elle incomplète ? C'est ce que les physiciens objectent à Davis qui, loin de se décourager, n'aura de cesse d'améliorer son dispositif au cours des trente années suivantes.

Entre-temps, l'idée que les neutrinos puissent, comme les quarks, évoluer au cours du temps en oscillant d'une famille à l'autre fait son chemin. Lors de son trajet entre le cœur du Soleil et la Terre, une fraction des neutrinos électroniques pourraient alors se transformer en neutrinos muoniques par exemple. L'oscillation expliquerait ainsi le déficit de neu-





LE DÉTECTEUR Super-Kamiokande, gigantesque cuve d'eau (ici en cours de remplissage) entourée de tubes à « lumière Cherenkov », a montré que le flux de neutrinos produits dans l'atmosphère était plus faible que prévu, et, partant, que ces particules se transforment d'un type en un autre.

trinos électroniques dans l'expérience de Davis, qui ne détecte pas les neutrinos muoniques. L'idée que les neutrinos oscillent avait des conséquences importantes. En premier lieu, elle impliquerait que les neutrinos aient une masse, contrairement à ce que suggère le Modèle standard « minimal ». Car la mécanique quantique permet l'oscillation de particules seulement si elles sont massives. Mais l'oscillation des neutrinos ouvre également de nouvelles perspectives pour le problème de l'asymétrie entre matière et antimatière ! Pour trois familles de neutrinos, en effet, une violation de CP est possible,

similaire, en principe, à celle qui se produit pour les quarks. Toutefois, parce que les neutrinos ne sont sensibles qu'à l'interaction faible, cette violation se manifesterait de façon beaucoup plus importante à haute température : en effet, l'interaction forte ne pourrait pas détruire la cohérence quantique d'un mélange de neutrinos.

Pour ces raisons, l'annonce, en 1998, de la confirmation des résultats de Davis connaît un fort retentissement [11]. En utilisant une cuve remplie de 50 000 tonnes d'eau, les physiciens de l'expérience « SuperKamiokande », installée au Japon, mon-

[11] M. Eukada *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, 81, 1562, 1998.

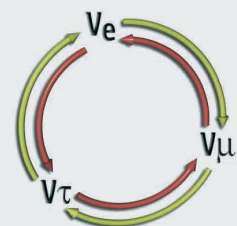
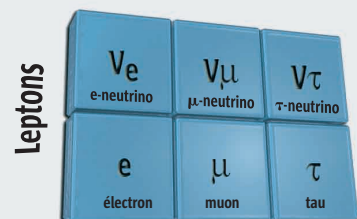
DÉFINITION La carte d'identité des neutrinos

■ **LES NEUTRINOS** sont, après les photons, les particules élémentaires les plus nombreuses de l'Univers. Ils se forment notamment dans les étoiles, lorsque l'hydrogène se transforme en hélium. Les neutrinos font partie de la famille des « leptons », qui sont insensibles à l'interaction forte, et dont le spin, propriété quantique apparentée à la rotation des particules

sur elles-mêmes, vaut + 1/2. Électriquement neutres, les neutrinos interagissent très peu avec la matière. Plus de mille milliards de neutrinos traversent ainsi notre corps à chaque seconde.

■ **IL EN EXISTE TROIS TYPES :** le neutrino de l'« électron » (découvert en 1956), du « muon » (1962), et du « tau » (1977), qui peuvent évoluer d'un type à un autre au cours

du temps. Depuis la mise en évidence de ce phénomène appelé « oscillation des neutrinos » (en bas à droite), on sait que ces particules possèdent une masse. Celle-ci n'est pas encore déterminée, mais les résultats expérimentaux montrent que la masse du plus lourd des neutrinos doit être un million de fois inférieure à celle de l'électron.

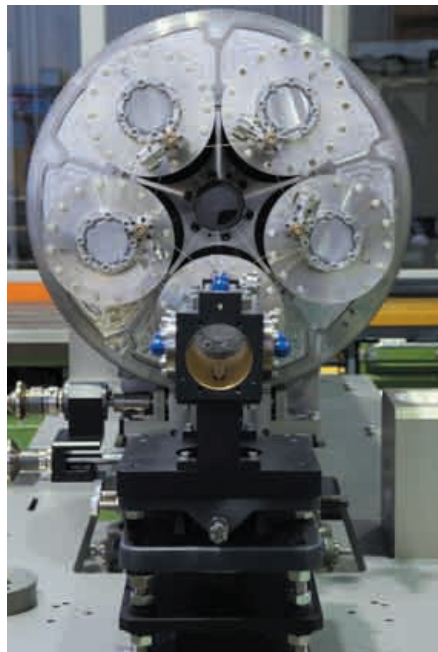


⇒ trent que le flux de neutrinos produit dans l'atmosphère par les rayons cosmiques est lui aussi plus faible que prévu. La précision des détecteurs n'apporte pas toutes les garanties, mais les physiciens soutenant l'hypothèse de neutrinos dépourvus de masse se retrouvent sur la défensive. Cette expérience ouvre également la voie à des tests plus poussés concernant le phénomène d'oscillation des neutrinos, ainsi qu'à son paramétrage. Par exemple, les physiciens prévoient que la longueur d'oscillation doit être proportionnelle à l'énergie des neutrinos, et inversement proportionnelle à la différence du carré de leurs masses.

Sources contrôlées

En pratique, ces tests consistent à s'affranchir des incertitudes du modèle solaire (tel le profil de température), en étudiant des sources de neutrinos contrôlées par les physiciens. À cette fin, les réacteurs des centrales nucléaires sont particulièrement intéressants : ils émettent des antineutrinos électroniques, et l'énergie totale des réactions qui s'y déroulent est bien caractérisée.

En 2004, le détecteur « KamLAND » a ainsi observé un déficit d'antineutrinos émis par l'ensemble des centrales japonaises. Ce résultat a par ailleurs permis de préciser la différence des carrés des masses



CES TUBES (en coupe sur la photographie) permettent d'envoyer un faisceau de neutrinos depuis le CERN, près de Genève, jusqu'au laboratoire du Gran Sasso, dans les environs de Rome. Produit en lançant des protons de haute énergie sur une cible de plomb, le faisceau est large d'environ un kilomètre à son arrivée au laboratoire italien. © MAXIMILIEN BRICE/CERN GENEVA

pour l'oscillation des neutrinos solaires.

Les accélérateurs de particules représentent une source encore mieux contrôlable. Ils émettent des faisceaux de neutrinos en direction des détecteurs, dont le lieu est choisi selon les longueurs d'oscillation. Tel est le cas du détecteur « Minos », qui enregistre la présence de neutrinos muoniques émis 735 kilomètres plus loin au Fermilab. En juillet 2006, les premiers résultats ont montré qu'une fraction de ces neutrinos disparaissaient au cours de leur trajet.

Pour apporter une preuve définitive du phénomène d'oscillation, et franchir un pas important dans sa compréhension, il reste à établir un rapport direct entre la disparition d'un type de neutrinos et l'appari-

tion d'un autre. Le détecteur Opera est conçu pour cela. Depuis septembre 2006, il détecte les neutrinos tauïques issus de l'oscillation des neutrinos muoniques envoyés depuis le CERN. Plusieurs années seront nécessaires pour identifier les rares neutrinos tauïques provenant de l'oscillation. L'étude de la violation de CP dans les neutrinos pourra ensuite se faire. La confirmation de ce phénomène suggérerait fortement que le problème de l'asymétrie entre matière et antimatière a enfin trouvé une réponse satisfaisante. ■ J. O.

TECHNIQUE Détecter l'insaisissable

■ **LA PLUPART DES NEUTRINOS** et de leurs particules-miroirs (les antineutrinos) que l'on détecte sont d'origine extraterrestre. Ils sont produits lors des réactions de fusion nucléaire dont le cœur du Soleil tire son énergie, lors d'explosion de supernovae ou lors de réactions de spallation*, dans les rayons cosmiques. Une autre source, humaine, est le résultat de la fission des noyaux lourds dans les centrales nucléaires, ainsi que les chocs créés dans les accélérateurs de particules. Dernière source, les éléments radioactifs qui se désintègrent en émettant des antineutrinos.

■ **LES NEUTRINOS ET LES ANTINEUTRINOS** ne sont jamais détectés directement, mais au travers des particules chargées qu'ils créent lors de chocs avec des noyaux atomiques. Ces chocs sont très rares : un neutrino solaire n'a qu'une chance sur cent milliards d'en subir en traversant la Terre. Ce type d'interaction est utilisé par tous les détecteurs de neutrinos. Ceux-ci sont enfouis sous terre afin d'être protégés des rayons cosmiques, ces noyaux atomiques qui bombardent l'atmosphère terrestre et pourraient fausser les mesures.

■ **LES DÉTECTEURS** sont constitués d'une cuve emplie de liquide, avec lequel de rares neutrinos vont entrer en collision. Ces chocs produisent des électrons ou des muons ultra-énergétiques, dont la vitesse est plus grande que celle de la lumière dans ce milieu. Ces particules émettent alors une lumière dite « Cherenkov », captée par des cellules photosensibles. Dans certaines expériences, le rôle de la cuve est joué directement par la pleine mer ou la glace de l'Antarctique. J.-O. B.

* La **spallation** est la fission de noyaux atomiques lors d'un choc très énergétique.