

à l'électron est associé le positron, version positive de l'électron. Quand un électron et un positron entrent en collision, leurs charges opposées s'annulent, et les deux particules s'annihilent en émettant deux photons. Or l'absence totale de charges portées par le neutrino droit (ni charge électrique, ni charge faible) pourrait signifier que les neutrinos ont strictement le même rapport à la matière et à l'antimatière : ils seraient leurs propres antiparticules. Dans ce cas, les neutrinos seraient des « particules de Majorana », tandis que les électrons ou les muons, qui diffèrent de leurs antiparticules, sont des « particules de Dirac ».

Si le mécanisme de *seesaw* est pertinent, alors les neutrinos gauches sont influencés non seulement par la masse des neutrinos droits, mais aussi par leur propriété de Majorana. Autrement dit, si certains neutrinos sont identiques à leurs propres antiparticules, il en est ainsi de tous les neutrinos.

Si les neutrinos étaient des particules de Majorana, toute une série de conséquences fascinantes en découleraient. Par exemple,

les neutrinos pourraient déclencher des transitions de particules à antiparticules, qui violeraient la conservation du nombre leptonique. Ce nombre, égal au nombre de leptons diminué du nombre d'antileptons en présence, est normalement conservé dans les réactions. Si les neutrinos conduisent à une violation de cette loi de conservation, le déséquilibre entre matière et antimatière dans l'Univers pourrait peut-être s'expliquer...

## L'antineutrino, identique au neutrino ?

La question de la relation entre les neutrinos et leurs antiparticules ne devrait pas rester longtemps sans réponse. De nombreuses expériences sont menées pour tenter de savoir si les neutrinos sont ou non leurs propres antiparticules. Toutes consistent à rechercher ce que l'on nomme la « double désintégration bêta sans neutrinos ».

Rappelons que les neutrinos et les antineutrinos ont été observés pour la première fois dans des désintégrations bêta, où un noyau atomique se transforme en émet-

tant un électron et un antineutrino. Or avec certains isotopes, il arrive qu'au sein d'un noyau atomique, deux désintégrations bêta se produisent simultanément, ce qui émet normalement deux électrons et deux antineutrinos. Mais si le neutrino est identique à sa propre antiparticule, les deux antineutrinos (ou neutrinos) pourraient disparaître en s'annihilant mutuellement. Cette situation est ce que l'on nomme une double désintégration bêta sans neutrinos (voir l'encadré de la page ci-contre), transformation où le nombre leptonique n'est pas conservé.

Aujourd'hui, l'éventuelle mise en évidence de la double désintégration bêta sans neutrinos constitue le plus grand espoir de prouver que les neutrinos sont des particules de Majorana et d'obtenir un cas avéré de non-conservation du nombre leptonique.

Dans leur principe, les expériences sont simples : elles consistent à attendre qu'une double désintégration bêta se produise au sein d'un isotope radioactif (par exemple le germanium 76), puis à observer la présence ou l'absence de neutrinos. En pratique, ce type de désintégration étant très rare, il

## L'oscillation entre saveurs muonique et électronique observée directement

En juillet 2013, à l'occasion d'une grande conférence internationale à Stockholm, la collaboration T2K a annoncé avoir observé directement la transformation en vol de neutrinos muoniques en neutrinos électroniques.

Postulé par le physicien italien Bruno Pontecorvo dès 1962, ce phénomène d'« oscillation », c'est-à-dire de changement périodique en vol de la « saveur » d'un neutrino de masse non nulle, avait déjà été mis en évidence, mais sans observation directe de la saveur apparue.

Les neutrinos connus sont tous de masse non nulle, et leurs trois types – les saveurs électronique, muonique et tauique – sont associés à l'électron, au muon et au tau. Jusqu'à présent, on a cherché à mettre en évidence leurs oscillations dans les flux de neutrinos solaires, atmosphériques ou issus de réacteurs nucléaires ou d'accélérateurs selon deux types d'expériences : « par disparition » (on détecte moins de neutrinos de la saveur initiale que prévu) ou « par apparition » (on observe des neutrinos

d'une saveur qu'il n'était pas présente dans la source).

Toutefois, les saveurs de neutrinos ne sont identifiables qu'à travers certaines de leurs interactions, dites à courant chargé (CC), où le partenaire chargé (l'électron, le muon ou le tau) est produit puis détecté. Leurs autres interactions, dites à courant neutre (CN), ne permettent pas d'identifier les saveurs.

Jusqu'à récemment, la plupart des preuves d'oscillations de neutrinos provenaient d'expériences « par disparition ». Après l'observation de la disparition des neutrinos muoniques dans les neutrinos atmosphériques et celle des neutrinos électroniques venant du Soleil, la preuve décisive du phénomène d'oscillation est venue de l'observation subtile, par les expériences *SuperKamiokande* au Japon et SNO au Canada, des interactions CC et CN. Ces expériences ont prouvé un déficit de neutrinos électroniques, mais aussi montré que le nombre total de neutrinos détectés (CC + CN) est bien le flux total attendu. Les neutrinos électroniques ont

donc oscillé vers les autres saveurs, muoniques et tauiques.

Pour convaincre que soit cette première confirmation, il manquait une observation directe – c'est-à-dire par apparition – de la transformation de saveur. C'est ce que la collaboration T2K a réalisé dès 2011 et confirmé dans les résultats présentés cet été. T2K utilise un faisceau très intense de neutrinos essentiellement muoniques produits par l'accélérateur de protons J-PARC, à Tokai sur la côte Est du Japon. Ce faisceau de neutrinos, dont la nature muonique est contrôlée par deux dispositifs complexes, nommés INGRID et ND280, est dirigé vers le gigantesque détecteur souterrain *SuperKamiokande* (SK), près de la côte Ouest du Japon, à 295 kilomètres de J-PARC.

Les deux dispositifs – proche et lointain – identifient très bien les neutrinos qu'ils détectent. L'analyse des données recueillies par le détecteur SK montre que le nombre de neutrinos électroniques enregistrés (un total de 28 événements) est significativement supérieur à celui at-

tendu (4,6 événements) en l'absence de l'oscillation muonique → électronique. La probabilité que cette observation résulte d'une fluctuation statistique est infime : moins de une chance sur 1 000 milliards.

Ainsi, T2K a observé directement l'apparition de neutrinos électroniques dans un faisceau de neutrinos muoniques. Cette avancée majeure ouvre la voie à de nouvelles expérimentations portant sur la violation de la symétrie CP (charge-parité), une propriété fondamentale qui différencie la matière de l'antimatière. À ce jour, l'observation de la brisure de la symétrie CP n'a été mise en évidence que dans le domaine des quarks. La violation de la symétrie CP, si elle est également présente dans le domaine des neutrinos, pourrait avoir joué un rôle important dans les premiers instants de l'Univers. Elle apporterait ainsi une explication à l'un des grands mystères de la physique : pourquoi l'antimatière est-elle pratiquement absente dans l'Univers ?

J. Dumarchez et E. Mazzucato  
Collaboration T2K

faut rassembler des quantités énormes de germanium 76 ou d'autres isotopes afin d'avoir un (tout petit) espoir de l'observer. Qui plus est, le flux constant de particules subatomiques qui s'abat sur la Terre avec les rayons cosmiques tend à noyer le minuscule signal des doubles désintégrations bêta. Les expérimentateurs doivent donc enterrer profondément leurs détecteurs, par exemple dans d'anciennes mines.

À ce jour, une seule double désintégration bêta sans neutrinos a été annoncée. Ce résultat, celui de la collaboration HMBB (Heidelberg-Moscou Double Beta decay) dont les installations se trouvent dans le tunnel du Gran Sasso en Italie, a aussitôt été vivement contesté par d'autres physiciens et vient d'être invalidé par les premiers résultats de l'expérience GERDA, effectuée aussi dans le laboratoire souterrain du Gran Sasso et utilisant le même isotope que HMBB, mais avec un dispositif amélioré.

## Les doubles désintégrations bêta passées au peigne fin

Les détecteurs de nouvelle génération commencent tout juste à enregistrer des données ou sont encore en construction. Ils devraient effectuer un crible plus minutieux. L'expérience EXO-200 au Nouveau-Mexique, par exemple, ainsi que l'expérience KamLAND-Zen au Japon, ont récemment publié les premières données de leurs recherches de doubles désintégrations bêta sans neutrinos. Elles semblent contredire l'annonce HMBB, sans pour autant l'invalider complètement.

EXO-200 comme KamLAND-Zen poursuivent leur exploitation, et un appareil nommé CUORE devrait commencer à recueillir des données en Italie en 2014. Le nombre d'expériences avancées désormais en cours laisse espérer que l'existence ou non des doubles désintégrations bêta sans neutrinos sera établie avant la fin de la décennie...

Le statut des neutrinos en tant que particules de Majorana ou de Dirac n'est pas la seule énigme posée par ces leptons, loin s'en faut. Nous sommes aussi aux prises avec ce qui les rend vraiment étranges : le mécanisme par lequel ils « oscillent », c'est-à-dire se métamorphosent les uns en les autres.

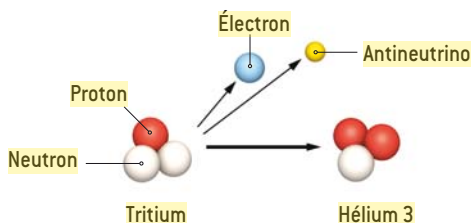
De nombreuses équipes de physiciens recherchent des symétries nouvelles susceptibles d'expliquer un tel comportement. Une possibilité serait l'existence de

## AU CŒUR DE L'ANTIMATIÈRE

Un certain nombre d'expériences dans le monde ont été conçues pour observer un phénomène nucléaire rare : la double désintégration bêta. Ces expériences visent à tester l'hypothèse selon laquelle, dans le domaine des neutrinos, la matière et l'antimatière sont une seule et même chose. Si les neutrinos sont identiques à leurs propres antiparticules, ils pourraient modifier l'équilibre entre matière et antimatière dans l'Univers, ce qui expliquerait peut-être comment la matière en est arrivée à dominer l'antimatière.

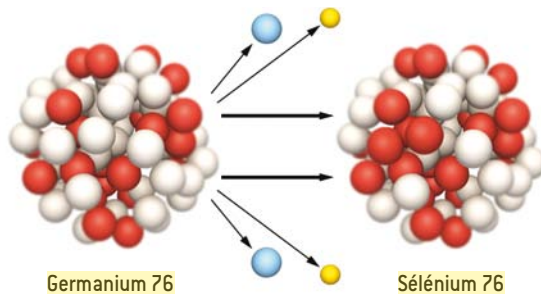
### Désintégration bêta simple

Certains noyaux radioactifs évoluent vers un état plus stable par désintégration bêta. Ici du tritium (un isotope de l'hydrogène) se transforme en hélium 3 après transformation d'un neutron en un proton, laquelle est accompagnée de l'émission d'un électron et d'un antineutrino.



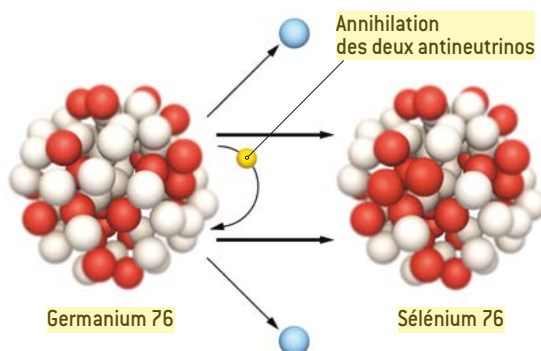
### Double désintégration bêta

De rares noyaux radioactifs peuvent subir deux désintégrations bêta (transformant deux neutrons en protons) simultanément, ce qui produit normalement deux électrons et deux antineutrinos.



### Double désintégration bêta sans neutrinos

Si le neutrino et l'antineutrino sont identiques, les deux antineutrinos d'une double désintégration bêta peuvent s'annihiler mutuellement. Cette situation a peut-être été observée déjà une fois, mais cette détection reste controversée.



## Les secrets des neutrinos sont-ils écrits sur la voûte céleste ?

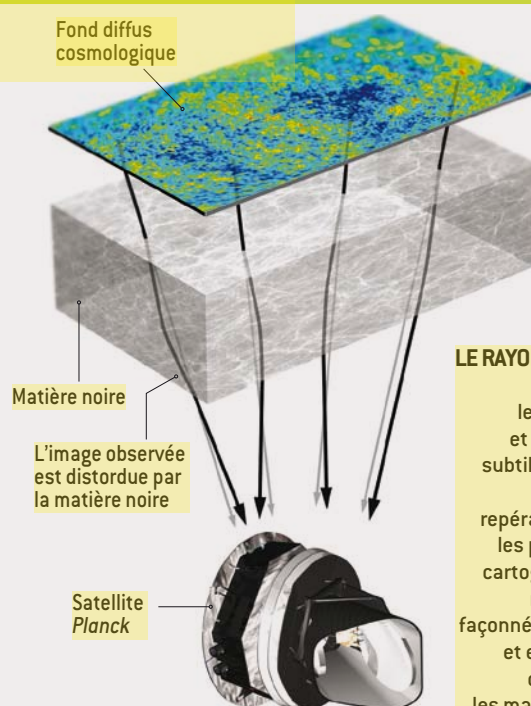
Mesurer la minuscule masse des neutrinos est resté impossible jusqu'à présent. Les nombreuses expériences menées ces dernières décennies n'ont réussi qu'à poser des limites très larges aux masses des trois neutrinos connus.

Nous avons de bonnes raisons de penser que le meilleur moyen de mesurer la masse de ces particules est, aussi étonnant que cela puisse paraître, de rechercher leur influence aux plus grandes échelles de l'Univers. En effet, bien que les neutrinos soient pratiquement dépourvus de masse et presque indétectables, leur nombre même (il y en aurait de l'ordre de  $10^{89}$  dans l'Univers) en fait des acteurs cosmologiques importants.

Notre raisonnement est le suivant. Très tôt dans l'histoire de l'Univers, quand tout était très chaud et dense, des réactions nucléaires ont formé

l'hélium à partir de l'hydrogène et émis d'énormes quantités de neutrinos. À mesure de son évolution, l'Univers s'est dilaté et refroidi, de sorte que les petites fluctuations de densité de la soupe primordiale ont été amplifiées ; dans les régions de densité supérieure à la moyenne, l'attraction gravitationnelle a davantage concentré la matière.

La matière noire a été la première à se concentrer en grumeaux, parce qu'elle ne participe qu'aux interactions gravitationnelles. Ces grumeaux initiaux de matière noire ont formé les germes des galaxies et des amas de galaxies que nous voyons aujourd'hui. Extrêmement légers, les neutrinos n'ont commencé que récemment à s'agréger (il y a seulement un milliard d'années, contre 13 milliards pour la matière noire). Du fait que les neutrinos errent librement à travers le cosmos sans rencontrer



**LE RAYONNEMENT DE FOND** diffus collecté par les télescopes au sol et dans l'espace a été subtilement déformé par la matière noire. En repérant ces distorsions, les physiciens peuvent cartographier la matière noire, qui aurait été façonnée par les neutrinos, et en déduire des fourchettes étroites sur les masses des neutrinos.

George Ratsack

symétries réglant la façon dont les particules connues se transforment les unes en les autres. Gautam Bhattacharyya, de l'Institut Saha de physique nucléaire de Calcutta, Philipp Leser, de l'Université technique de Dortmund en Allemagne, et l'un de nous (H. Päs) ont récemment découvert que de telles symétries auraient un effet flagrant sur le champ de Higgs. L'interaction du champ de Higgs avec des neutrinos et des quarks à saveurs variables se manifesterait alors par des produits exotiques de désintégration des bosons de Higgs, produits qui devraient être observables au LHC. Un tel signal pourrait nous renseigner sur le mécanisme sous-jacent de la métamorphose des neutrinos, ce qui serait une découverte spectaculaire.

Entre-temps, une autre famille d'expériences tend à préciser à quelle fréquence les neutrinos changent de saveur. Des expériences telles que T2K au Japon, MINOS dans le Minnesota et OPERA en Italie détectent des faisceaux de neutrinos issus d'accélérateurs de particules et mesurent les saveurs après que les neutrinos ont parcouru de grandes distances à travers la Terre (voir l'encadré pages 22 et 23). Les échelles de ces expériences sont tellement grandes que les neutrinos traversent des pays entiers au cours de leur trajet. En

complément, les expériences de neutrinos auprès des réacteurs *Double Chooz* en France, *Daya Bay* en Chine et *RENO* en Corée du Sud mesurent toutes trois les oscillations – c'est-à-dire les changements de saveur – à courte distance de neutrinos émis par des réacteurs nucléaires.

### Un rôle éventuel dans l'asymétrie matière-antimatière

Ce n'est qu'en 2012 que ces expériences ont enfin déterminé le dernier et le plus petit des « angles de mélange », ces paramètres régissant les oscillations entre saveurs de neutrinos. Le dernier angle de mélange contrôle la probabilité de conversion d'un antineutrino ou d'un neutrino électronique.

La mesure de cet angle de mélange ouvre la voie à de futures expériences visant à comparer les propriétés des neutrinos et des antineutrinos. Une asymétrie entre ces particules et leurs antiparticules correspondrait à une violation de la « symétrie CP ». Quand cette symétrie est respectée, le résultat de tout processus ou réaction entre particules reste inchangé quand on remplace les particules par leurs antiparticules (symétrie par conjugaison de charge, notée C) et la droite

par la gauche (symétrie de parité, notée P). La mise en évidence d'une violation de la symétrie CP par les neutrinos, ajoutée aux études des doubles désintégrations bêta sans neutrinos, pourrait nous renseigner sur le mystère de l'excès de matière par rapport à l'antimatière dans notre Univers.

Parmi toutes les recherches en cours, T2K est probablement l'expérience qui a le plus de chances d'observer pour la première fois des indices de violation de la symétrie CP par les neutrinos. Mais une course s'est engagée entre les expériences de nouvelle génération pour répondre à plusieurs questions clefs relatives aux neutrinos.

Actuellement en construction aux États-Unis, l'expérience NOvA pourrait aussi mettre en évidence une violation de la symétrie CP par les neutrinos. NOvA utilisera un faisceau de neutrinos émis par le Laboratoire de l'accélérateur national Fermi de Batavia, dans l'Illinois, et atteignant un détecteur situé à Ash River, dans le Minnesota, soit 810 kilomètres plus loin. L'un des objectifs de NOvA est de clarifier la hiérarchie entre les masses des neutrinos. Pour le moment, les physiciens savent seulement qu'au moins deux des types de neutrinos ont une masse non nulle...

Il y a tant d'expériences de conceptions et d'objectifs différents en cours sur les