

Une explication alternative de la masse des neutrinos est fournie par la supersymétrie, l'une des principales propositions théoriques d'extension du modèle standard. L'hypothèse essentielle de cette théorie est qu'à chacune des particules élémentaires du modèle standard est associé un « superpartenaire » (une particule de spin entier si le spin de la première est demi-entier, et inversement). L'existence de ces particules non encore observées doublerait instantanément le nombre de particules élémentaires. Le puissant collisionneur LHC (*Large Hadron Collider*) du CERN sera-t-il capable de les produire ? À ce stade, tous les superpartenaires ont échappé aux détecteurs, peut-être parce que leurs masses sont très élevées et que les énergies atteintes dans les collisionneurs sont donc insuffisantes pour les produire.

Une masse venant des neutralinos ?

Les neutralinos, objets prédits par la supersymétrie, sont des combinaisons de certains des superpartenaires des particules d'interaction du modèle standard (photon, boson Z, boson de Higgs). Dans la plupart des théories supersymétriques, les neutralinos sont stables, mais il existe aussi des

modèles où ils ne le sont pas. Dans le plus simple d'entre eux, nous avons montré que les neutrinos acquièrent leur masse par une variante du mécanisme de *seesaw*, où le rôle de particules de très grande masse est joué par les neutralinos.

En collaboration avec José Valle, de l'Université de Valence en Espagne, et Jorge Romão, de l'Université technique de Lisbonne au Portugal, deux d'entre nous (M. Hirsch et W. Porod), ont montré que le lien entre les neutrinos et les neutralinos pourrait être exploré au LHC. Si la stabilité des neutralinos dépend effectivement des neutrinos, alors on pourra prédire la durée de vie des neutralinos à partir des propriétés des neutrinos. Et, d'après nos calculs, la superparticule a une durée de vie suffisante pour qu'on puisse la suivre, de sa production à sa désintégration, à l'intérieur des détecteurs du LHC.

Quoi qu'il en soit, toutes les explications plausibles des faibles masses des neutrinos gauches pointent dans des directions de la physique qui n'ont pas encore été explorées. Le mécanisme de *seesaw*, par exemple, pourrait nous éclairer sur cette grande énigme qu'est la domination, manifeste dans l'Univers, de la matière sur l'antimatière.

On associe à toute particule une antiparticule de charge opposée. Par exemple,

■ LES AUTEURS

Martin HIRSCH travaille à l'Institut de physique corpusculaire IFIC, centre conjoint de l'Université de Valence et du Conseil supérieur de la recherche scientifique d'Espagne.

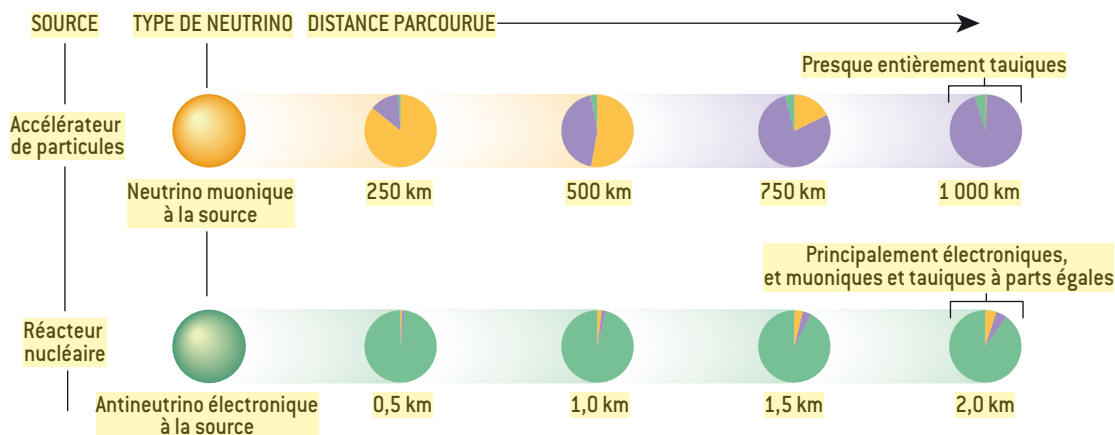
Heinrich PÄS est professeur à l'Université technique de Dortmund, en Allemagne.

Werner POROD est professeur à l'Université de Würzburg, en Allemagne.

Transformations classiques

Les expériences d'oscillation de neutrinos mesurent les différences de saveurs entre un flux de neutrinos à sa source (réacteur, accélérateur) et ce même flux à distance. Ci-dessous,

les proportions de neutrinos muoniques et d'antineutrinos électroniques ayant « oscillé » sont rapportées sur des diagrammes circulaires en fonction de la distance à la source.



Jen Christensen

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