

SciLogs

La nouvelle communauté de
blogueurs scientifiques francophones

Grâce à **Scilogs.fr**, dialoguez avec des chercheurs et acteurs du monde des sciences aux points de vue riches et variés. De blog en blog, explorez la science avec ceux qui la font, la décryptent, l'analysent : résultats de recherche, applications pratiques, perspectives insolites, débats éthiques et politiques... Pour vivre la science au quotidien !

Signal sur bruit

Richard Taillet
Astrophysicien,
professeur
chercheur
au LAPTh

Psycho Info

Jérôme Palazzolo
Médecin psychiatre, à Nice
et à l'Université Internationale
Senghor, à Alexandrie,
en Égypte

Complexités

Jean-Paul Delahaye
Mathématicien, informaticien,
et auteur de la rubrique
Logique et calcul
dans *Pour la Science*

Cerveau aux hormones

*William Rostène
et Jacques Epelbaum*
Neuroscientifiques,
directeurs de recherche
à l'Inserm

Best of Bestioles

Loïc Mangin
Rédacteur en chef
adjoint
Pour la Science

Retrouvez
aussi les autres
communautés
« SciLogs » : déjà
plus 140 blogueurs
scientifiques
à l'international !

Réflexions stochastiques

Jean-Jacques Kupiec
Docteur en biologie,
ingénieur de recherche
Inserm au centre
Cavaillès

Prospective Spatiale

Christophe Bonnal
Expert en astronautique,
président des commissions
« Débris spatiaux »
à la IAA et l'IAF



Connectez-vous
maintenant
pour découvrir
www.SciLogs.fr !



Suivez les dernières actualités
des blogueurs également
sur les réseaux sociaux

Proposé par **POUR LA
SCIENCE**

LES NEUTRINOS, messagers de l'inconnu

Martin Hirsch, Heinrich Päs et Werner Porod

**Les neutrinos sont des particules si étranges
qu'ils devraient bientôt nous conduire
à des domaines inexplorés de la physique.**

Peu de physiciens ont eu le privilège d'introduire une nouvelle particule élémentaire. Ce fut le cas de Wolfgang Pauli avec le neutrino. Quand, en 1930, ce physicien autrichien subodore l'existence de son « neutron » – qui, après la découverte du véritable neutron trois ans plus tard, sera renommé neutrino –, il ressent d'emblée un grand trouble : « J'ai fait une chose terrible, dira-t-il, j'ai postulé une particule qui ne peut être détectée. » Nous savons aujourd'hui que Pauli avait tort : même si, pour y parvenir, il faut déployer beaucoup d'ingéniosité et de gigantesques efforts expérimentaux, les neutrinos peuvent être détectés.

Depuis plus de 80 ans, ces particules étonnent. Nous allons examiner comment elles s'inscrivent dans le bestiaire des particules élémentaires et les questions fondamentales qu'elles posent. Combien d'espèces de neutrinos existe-t-il ? Seulement trois ou davantage ? Pourquoi leurs masses sont-elles si incroyablement petites ? Les neutrinos sont-ils leurs propres antiparticules ? Et pourquoi changent-ils constamment d'espèce ?

1. L'INTERACTION D'UN NEUTRINO avec un atome conduit à l'émission d'un photon, enregistré grâce aux nombreux capteurs du détecteur (ici une vue d'artiste).



L'ESSENTIEL

- Les neutrinos sont des particules élémentaires atypiques.
- Dotés d'infimes masses, ils interagissent très peu et sont donc difficiles à détecter.
- Malgré des décennies de recherches, leurs propriétés restent mal connues et mal comprises.
- Les physiciens soupçonnent qu'ils sont la clef de certaines grandes énigmes de la physique et de la cosmologie.

Vault49

Les neutrinos sont de bien étranges particules fondamentales. Absents des atomes, ils ne jouent aucun rôle en chimie ; ce sont les seules particules élémentaires de matière dépourvues de charge électrique ; leurs masses sont inférieures au millionième de la masse de l'électron ; pire encore, ils sont inconstants par nature, puisqu'ils passent leur temps à « osciller » entre trois « saveurs », les saveurs électronique (associée à l'électron), muonique (associée au muon, sorte d'électron lourd) et tauique (associée au tau, encore plus lourd que le muon).

L'étude des neutrinos s'effectue en divers endroits du monde à l'aide de réacteurs nucléaires, d'accélérateurs de particules et d'immenses laboratoires souterrains. Les physiciens espèrent lire dans les bizarreries des neutrinos les indices dont ils ont besoin pour progresser vers une théorie cohérente des trois interactions fondamentales auxquelles sont soumises les particules subatomiques : l'interaction électromagnétique, l'interaction faible (à l'origine de la radioactivité bêta) et l'interaction forte (responsable de la cohésion des noyaux atomiques). Dans cette quête vers ce que l'on nomme une théorie de grande unification, on en est à l'étape du modèle standard, théorie efficace mais n'intégrant pas toutes les propriétés étranges des neutrinos, et qui doit donc être étendue.

Les neutrinos sont des leptons, c'est-à-dire des particules participant aux interactions faibles, mais pas aux interactions fortes. Dans le modèle standard, les théoriciens n'ont introduit que les seuls neutrinos qui participent aux interactions faibles : les neutrinos « gauches », c'est-à-dire dont le spin (le moment cinétique intrinsèque) et la quantité de mouvement sont de sens opposés. Les neutrinos « droits », c'est-à-dire dont le spin et la quantité de mouvement sont de même sens, ne participent ni aux interactions électromagnétiques ni aux interactions faibles.

Des neutrinos droits et des neutrinos gauches

De ces constatations, il résulte que les neutrinos droits – s'ils existent – sont encore plus évanescents que les neutrinos gauches, dont l'existence est prouvée par des expériences... Pour autant, l'existence de neutrinos droits serait bienvenue, car elle fournirait peut-être une explication à l'énigme de l'extrême petitesse des masses des neutrinos gauches, qu'ils soient électroniques, muoniques ou tauiques.

Dans la vision qui sous-tend le modèle standard, les particules acquièrent leur masse en interagissant avec l'omniprésent

champ associé au boson de Higgs, particule découverte au CERN en 2012. Ce boson est la particule associée au champ de Higgs, tout comme le photon est la particule associée au champ électromagnétique. Lorsqu'une particule interagit avec le champ de Higgs, un boson de Higgs emporte sa « charge faible », une grandeur jouant dans l'interaction faible un rôle analogue à celui joué par la charge électrique dans l'interaction électromagnétique.

Puisqu'ils ne participent pas à l'interaction faible, les neutrinos droits n'ont pas de charges faibles et n'interagissent pas avec le champ de Higgs. Dès lors, leurs masses doivent résulter d'un mécanisme différent, à l'œuvre seulement aux très hautes énergies nécessaires à la grande unification des interactions. On s'attend donc à ce que la masse des neutrinos droits soit très élevée.

Selon certains physiciens, des effets quantiques entraîneraient un partage très asymétrique de la masse entre les neutrinos droits et gauches. Ils qualifient ce type de mécanisme de *seesaw*, c'est-à-dire de « balançoire à bascule », pour évoquer l'idée d'une masse importante située au bout d'un court bras de levier, qui contrebalance une petite masse placée à l'extrémité d'un long bras de levier.

CHANGER DE NATURE EN PLEIN VOL

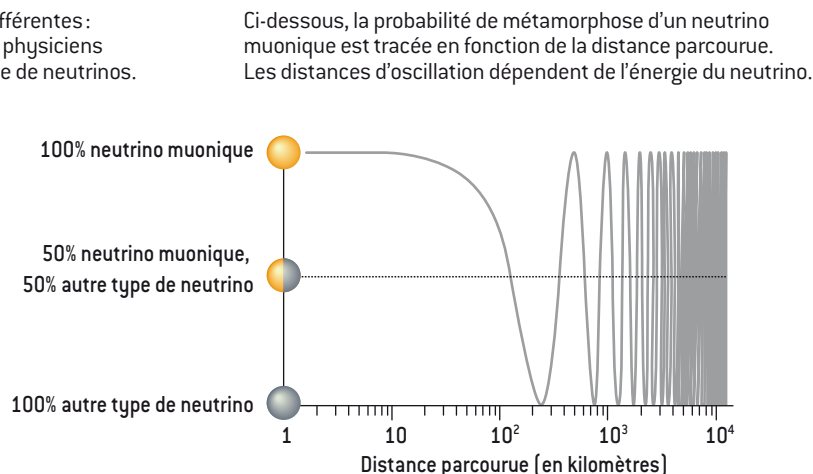
Les neutrinos se propagent à une vitesse proche de la lumière en interagissant très peu avec la matière, tout en changeant souvent de nature. En effet, leur « saveur » bascule de l'une à l'autre [parmi trois saveurs] selon une probabilité variant de

façon périodique. Pour étrange que soit ce comportement, les propriétés des neutrinos connus des physiciens leur permettent de calculer la probabilité qu'ils aient telle ou telle saveur à telle ou telle distance de leur source.

Palette de saveurs

On connaît des neutrinos de trois saveurs différentes : électronique, muonique et tauique. Certains physiciens soupçonnent l'existence d'un quatrième type de neutrinos.

- Neutrino muonique 
- Neutrino électronique 
- Neutrino tauique 
- Quatrième type de neutrino ? 



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

■ 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.

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.

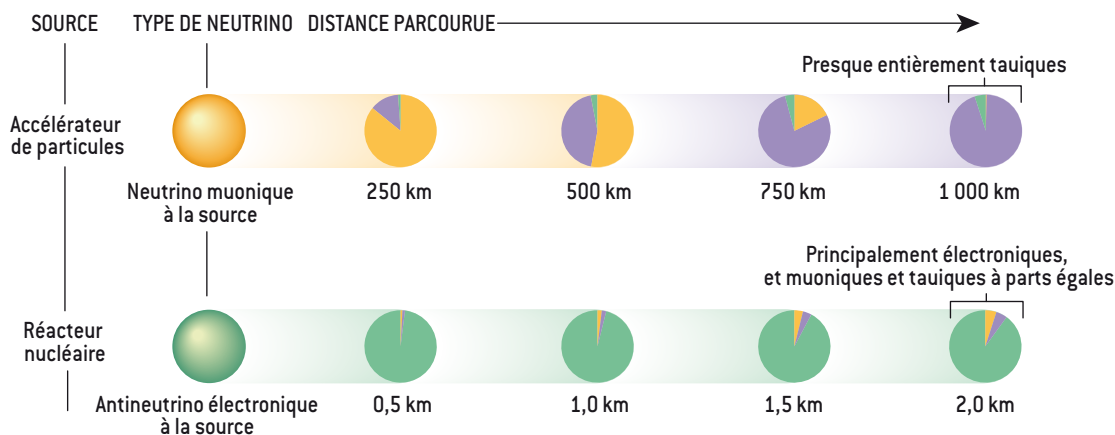
Quoi qu'il en soit, toutes les explications plausibles des faibles masses des neutrinos gauches pointent dans des directions de la physique qui n'ont pas encore été explorées. Le mécanisme de *seesaw*, par exemple, pourrait nous éclairer sur cette grande énigme qu'est la domination, manifeste dans l'Univers,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

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

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 qui 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.

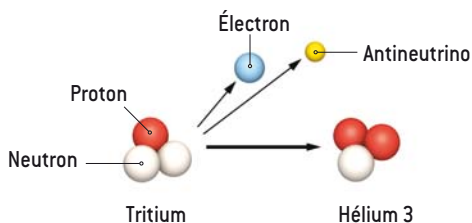
De nombreuses équipes de physiciens recherchent des symétries nouvelles susceptibles d'expliquer un tel comportement. Une possibilité serait l'existence de

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.

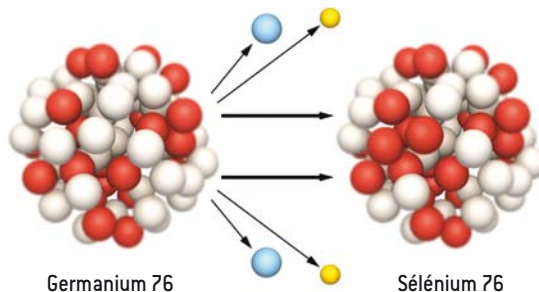
Désintégration bêta simple

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.



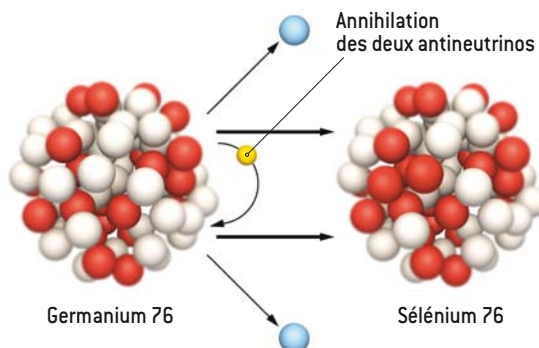
Double désintégration bêta

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 ?

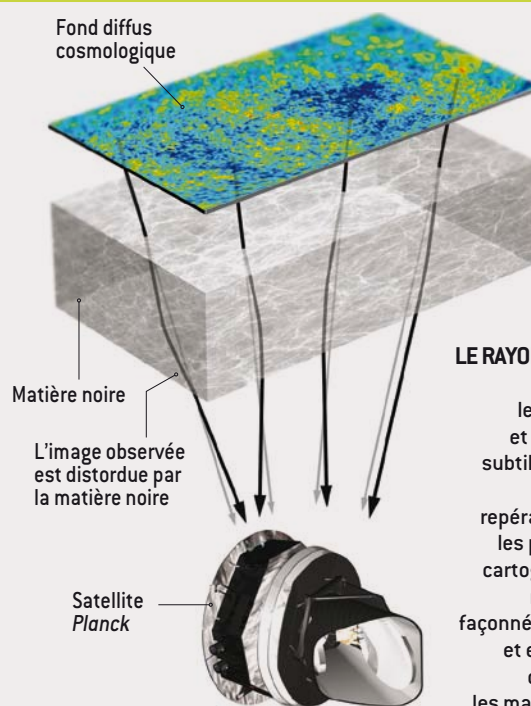
Mesurer la minuscule masse des neutrinos est resté impossible jusqu'à présent. Les nombreuses expériences menées ces dernières décennies n'ont réussi qu'à poser des limites très larges aux masses des trois neutrinos connus.

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

d'obstacles, la masse omniprésente qu'ils représentent a ralenti l'agrégation de la matière noire, effet qui devrait être détectable aujourd'hui.

Plus les neutrinos sont massifs, plus ils auront freiné l'agrégation de la matière, ce qui a pour effet de brouiller les contours de la structure à grande échelle de l'Univers. Pour cette raison, il est possible de déduire les masses des neutrinos de la répartition de la matière dans l'Univers.

Cartographier la distribution de la matière (qui est pour l'essentiel de la matière noire invisible) n'est pas une mince affaire. Mais les chercheurs ont remarqué que le rayonnement résiduel du Big Bang, le « fond diffus cosmologique », est légèrement déformé à cause des effets gravitationnels des grumeaux de matière noire

qui remplissent l'espace entre le fond diffus cosmologique et nous, et qui courbent les rayons lumineux. L'analyse de ces « lentilles gravitationnelles » du fond diffus cosmologique est une approche très prometteuse pour mesurer la distribution de matière noire dans l'Univers.

Les nouvelles mesures précises du rayonnement fossile qui sont en cours nous permettront de mesurer les déformations par effet de lentille avec la meilleure précision qui soit, et ainsi de cartographier la matière noire autrement invisible. Si la matière noire est confinée à des structures à bords nets séparés par des vides, nous pourrions en déduire que la masse des neutrinos est petite ; en revanche, si les contours sont flous, nous saurons que la masse des neutrinos est

plus grande. La nouvelle génération d'expériences portant sur le fond diffus cosmologique devrait permettre de déterminer les masses des trois types de neutrinos à un cinq millionième de la masse de l'électron près.

Qu'il soit possible de mesurer la masse de la plus légère et la plus insaisissable des particules élémentaires en observant l'Univers entier illustre une fois de plus comment l'étude de la physique, à toutes les échelles, continue de surprendre et de pousser les astrophysiciens à sonder en profondeur les rouages de la nature.

Sudeep Das

Laboratoire américain d'Argonne (Illinois)

Tristan Smith

Centre de physique cosmologique de l'Université de Californie à Berkeley

neutrinos que leurs résultats conduisent parfois à des contradictions. Une piste expérimentale séduisante (et controversée) suggère l'existence d'un quatrième type de neutrinos : le neutrino stérile. Cette particule, qui aurait déplié à Pauli, ne serait détectable qu'indirectement, comme le neutrino droit ultramassif invoqué pour faire fonctionner le mécanisme de *seesaw*.

Néanmoins, plusieurs expériences ont peut-être repéré des traces du neutrino stérile. Des mesures effectuées auprès de réacteurs depuis 30 ans suggèrent en effet un déficit en neutrinos électroniques de quelque six pour cent. Par ailleurs, menée au Laboratoire de Los Alamos (États-Unis) dans les années 1990, l'expérience LSND a mis en évidence des indices (controversés) de conversions inhabituelles d'antineutrinos. L'expérience MiniBooNE du Fermilab (États-Unis), qui a livré ses premiers résultats en 2007, suggère aussi l'existence de telles conversions.

Cependant, toute une série d'expériences, par exemple CDHSW (CERN Dortmund Heidelberg Saclay Warsaw) et MINOS (au Fermilab, États-Unis) menées auprès d'accélérateurs, vont plutôt à l'encontre de l'hypothèse d'un neutrino stérile.

La théorie quantique n'autorise les neutrinos à changer de saveur que si chaque

saveur est associée à une masse différente. Les différentes masses des neutrinos pourraient déclencher des oscillations expliquant les signaux anormaux observés à LSND et à MiniBooNE, mais seulement s'il existe une autre différence de masse en plus de celles que nous connaissons déjà – en d'autres termes, seulement s'il existe quatre types de neutrinos et non trois.

Cependant l'existence d'un neutrino supplémentaire participant à l'interaction faible aurait pour conséquence une désintégration trop rapide du boson Z (l'un des médiateurs de l'interaction faible) ; il faut donc que le quatrième neutrino ne participe pas à l'interaction faible. C'est à cela que se réfère l'adjectif « stérile » : à un neutrino presque entièrement coupé du reste des autres particules élémentaires.

Un quatrième neutrino, qualifié de stérile ?

Les résultats surprenants obtenus à l'aide de détecteurs d'un nouveau type conçus pour enregistrer les neutrinos émis par des réacteurs nucléaires voisins indiquent peut-être l'existence d'un neutrino stérile. Les données de plusieurs expériences de réacteurs suggèrent une disparition anormale d'antineutrinos électroniques sur de courtes distances, ce qui, interprété en termes d'oscillations, suggère l'existence de neutrinos stériles. Cette anomalie est repérée depuis un moment, mais sa signification en faveur de l'existence d'un neutrino stérile n'a été comprise que récemment, après de nouveaux calculs du flux de neutrinos produits par les différents réacteurs.

Cependant, les indices en faveur de l'existence de neutrinos stériles restent vagues, indirects et sujets à controverse... MiniBooNE et une expérience rattachée nommée MicroBooNE, en préparation au Fermilab, pourraient bientôt livrer des éléments plus concrets sur la question.

Il est remarquable que le puissant LHC et les expériences à relativement basse énergie qui étudient l'humble neutrino se complètent aussi bien dans l'exploration des rouages intimes de la nature. Plus de 80 ans après l'introduction de la « particule qui ne peut pas être détectée » de Pauli, les neutrinos continuent à défendre leurs secrets et nous continuons à essayer de les percer. La lumière qui jaillira en physique fondamentale si nous y parvenons justifie sans doute amplement cette quête. ■

■ BIBLIOGRAPHIE

H. Päs, *The Perfect Wave*, Harvard University Press, à paraître, 2014.

Th. Lasserre et D. Vignaud, *La mystérieuse identité des neutrinos*, *Dossier Pour la Science* n° 62, pp. 36-42, janvier-mars 2009.

H. Päs, *Neutrino masses and particle physics beyond the Standard Model*, *Annalen der Physik*, vol. 11(8), pp. 551-572, 2002.

W. Porod *et al.*, *Testing neutrino mixing at future collider experiments*, *Physical Review D*, vol. 63(11), 115004, 2001.

L'amour chez les dinosaures

Comment les dinosaures s'accouplaient-ils ?
Cette question, longtemps restée une énigme complète,
commence à être étudiée scientifiquement.

La vue d'un squelette de dinosaure sur une publicité vantant le Wi-Fi, à l'aéroport de Chicago, m'a figé sur place. J'ai alors contemplé cette réplique de brachiosaure – un sauropode du Jurassique – avec ses pattes en forme de piliers, ses épaules massives emmanchées d'un long cou terminé par une petite tête carrée, qui semblait surveiller les atterrissages et les décollages. Mentalement, je dotais ce squelette des organes internes, des muscles et de la peau d'un animal de 25 mètres de long. C'est alors qu'une question saugrenue envahit mon esprit : comment cet animal gigantesque s'accouplait-il ?

Du fond de ma torpeur, je me transportais par la pensée 150 millions d'années dans le passé, à côté d'un couple de brachiosaures sur le point de s'accoupler dans l'une des clairières d'une forêt jurassique. Je n'arrivais pas à imaginer comment ils allaient s'y prendre. Le mâle enfourcherait-il la femelle ? Par l'arrière ? La queue ne gênerait-elle pas ? La femelle pourrait-elle supporter 50 tonnes sur son arrière-train ? En montant dans l'avion, j'embarquais avec moi ces questions captivantes.

Les dinosaures étaient des vertébrés terrestres : ils avaient donc des relations sexuelles. Comme chez les reptiles et les oiseaux actuels, les dinosaures mâles déposaient leur sperme à l'intérieur des femelles,

Brian Switek

L'ESSENTIEL

- Comme tous les vertébrés terrestres, les dinosaures s'accouplaient.
- Étant donné leur morphologie et les contraintes biomécaniques, il est difficile d'imaginer comment le coït se déroulait.
- Toutefois, l'observation des accouplements chez les oiseaux et chez les crocodiliens permet d'échafauder quelques hypothèses plausibles.
- Ces hypothèses peuvent être ensuite testées à l'aide de simulations informatiques.

qui pondaient ensuite des œufs fécondés contenant des embryons. Au-delà, que dire ? Très peu d'informations ont été recueillies sur la sexualité des dinosaures, peut-être parce que ce type de questionnement a longtemps été tabou ; de plus, cette problématique a dû sembler hors de portée de l'investigation scientifique ! Comment, en effet, affirmer avec confiance quoi que ce soit sur le sujet ?

Indices chez les oiseaux et les crocodiliens

Pour autant, tout espoir n'est pas perdu. D'une part, quelques fossiles livrent des indices intéressants, tels que l'âge de la maturité sexuelle ou certains caractères sexuels secondaires (des caractères jouant un rôle dans la parade nuptiale). D'autre part, l'étude des plus proches parents actuels des dinosaures – les oiseaux et les crocodiliens – laisse entrevoir les formes possibles des organes sexuels dinosaurens. On peut ensuite tester les hypothèses échafaudées à partir de l'étude des fossiles et des oiseaux ou des crocodiles actuels en mettant en images les modes d'accouplement envisagés.

Le registre fossile nous renseigne très peu sur la sexualité des animaux. Parmi les rares traces, citons le cas de ces tortues