

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

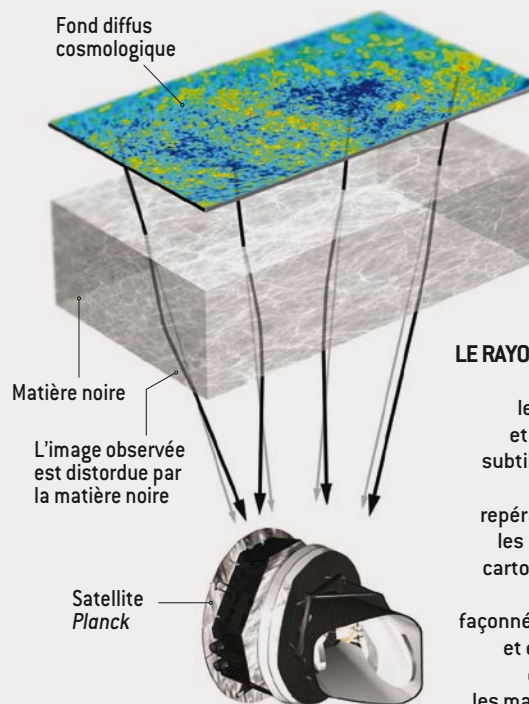
Mesurer la minuscule masse des neutrinos est resté impossible jusqu'à présent. Les nombreuses expériences menées ces dernières décennies n'ont réussi qu'à poser des limites très larges aux masses des trois neutrinos connus.

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.