

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

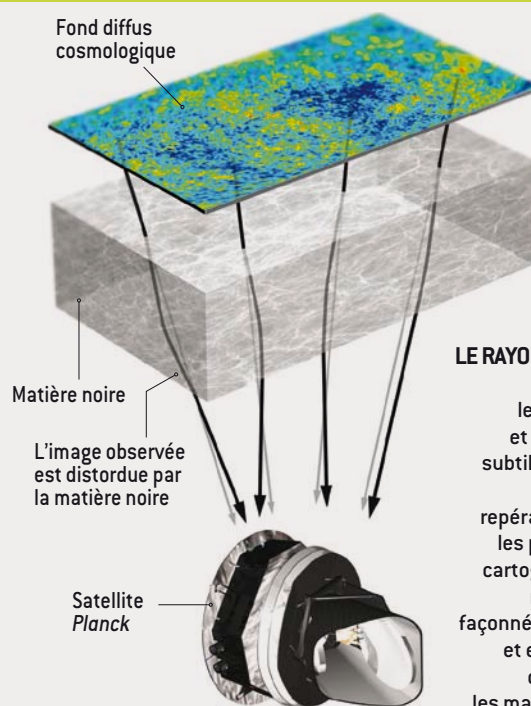
Mesurer la minuscule masse des neutrinos est resté impossible jusqu'à présent. Les nombreuses expériences menées ces dernières décennies n'ont réussi qu'à poser des limites très larges aux masses des trois neutrinos connus.

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 Ratschek

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