

de détection des neutrinos muoniques et des neutrinos GZK pour d'autres neutrinos cosmiques. Les données de la première année ont livré 26 neutrinos dont l'énergie était comprise entre 30 et 1 200 TeV, soit un total de 28 avec Ernie et Bert. Ce nombre était assez élevé pour, statistiquement, être confiant à 99,9999 % qu'il ne s'agissait pas de neutrinos atmosphériques, qui auraient été bien moins nombreux. Quand nous avons ensuite ajouté une autre année de données, le total a grimpé à 54 neutrinos, dépassant le seuil statistique communément admis pour valider une « découverte ». Nous avons observé des neutrinos venant de l'espace profond !

Identifier les sources

D'où exactement dans l'Univers ces neutrinos proviennent-ils ? Les événements que nous avons collectés jusqu'à présent ne constituent pas un échantillon assez grand pour nous apporter une réponse concluante. La carte du ciel où sont indiquées

les directions d'arrivée (*voir la figure page ci-contre*) montre que ces neutrinos ne viennent pas tous de la Galaxie. En effet, la plupart viennent de directions très éloignées du plan galactique, et sont donc presque certainement d'origine extragalactique.

Il semble néanmoins qu'un nombre important de neutrinos proviennent du centre de la Voie lactée. Bert (numéroté 14 sur la figure), qui reste l'un des neutrinos les plus énergétiques jamais observés, fait partie de ce groupement et provient à moins de un degré du centre galactique. Nous ne sommes pas en mesure de dire avec certitude pourquoi cette région émet tant de neutrinos, mais nous savons que le centre galactique regorge de vestiges de supernovæ et contient en outre un trou noir supermassif – autant de sources possibles de ces neutrinos.

Nous espérons nous faire une meilleure idée de l'origine des neutrinos cosmiques à mesure que nous continuerons de collecter plus de neutrinos muoniques traversant la Terre pour arriver jusqu'à nous. Parce

que ces particules produisent des traînées d'un kilomètre de long, leur direction peut être restituée à moins de 0,5 degré près ; il en résultera une carte du ciel plus précise. En comparant ces directions à la position d'objets célestes connus, tels que des galaxies brillantes abritant un noyau actif ou des sites de sursauts gamma, nous serons enfin capables de déterminer certaines des sources de rayons cosmiques.

IceCube commence seulement à gratter la surface des découvertes possibles. L'expérience est construite pour fonctionner vingt ans, peut-être plus. Nous réfléchissons déjà à la suite. D'autres expériences traquent également les neutrinos (*voir l'encadré page 29*) et notre équipe propose de construire un détecteur étendu utilisant environ 10 kilomètres cubes de glace, soit une dizaine de fois le volume de *IceCube*. Grâce à cette taille augmentée, nous pourrions enfin collecter suffisamment de neutrinos cosmiques pour déterminer avec confiance d'où ils émanent, eux et leurs cousins les rayons cosmiques. ■



Direction de l'innovation et des relations avec les entreprises

cnrs formation entreprises

14 axes de formation

Statistiques, bioinformatique et big data
Génie logiciel, modélisation, robotique
SIG, géographie, archéologie
Energie, environnement
Électronique, optique, métrologie
Matériaux et molécules : mise en oeuvre
Matériaux et molécules : caractérisation
Microscopie
Chromatographie, spectroscopie
Spectrométrie de masse
Résonance magnétique nucléaire
Biologie
Expérimentation animale
Qualité, sécurité

Des formations aux technologies de pointe pour les ingénieurs et les techniciens

Des stages de courte durée (3 à 5 jours), se déroulant dans les laboratoires du cnrs, en effectifs réduits (env. 10 stagiaires)

Une pédagogie basée sur l'expérimentation

La possibilité de stages organisés en intra-entreprise

Découvrez tous nos stages 2016 : cnrsformation.cnrs.fr

cfe.contact@cnrs.fr

« La recherche sur les neutrinos est en pleine effervescence »

Découverts à partir de 1956, les neutrinos sont des particules fortement intrigantes, dont les physiciens cherchent à mesurer les propriétés. De ces dernières dépendrait l'évolution de l'Univers.



Marco ZITO est physicien à l'Irfu, au centre du CEA à Saclay, et membre de la collaboration T2K.

Entretien avec Marco Zito

Le prix Nobel de physique 2015 a été décerné à Takaaki Kajita et Arthur McDonald pour leur rôle majeur dans les expériences *Super-Kamiokande*, au Japon, et *SNO*, au Canada. Ces détecteurs ont contribué à mettre en évidence le phénomène dit d'oscillation des neutrinos. En outre, le Breakthrough prize 2016 a récompensé cinq collaborations de physiciens (*Super-Kamiokande*, *K2K/T2K*, *SNO*, *Daya Bay*, *KamLAND*) qui étudient les propriétés de ces oscillations. Marco Zito, physicien au CEA, membre de l'expérience T2K et auteur du livre *Dans le tourbillon des particules* (Belin, 2015), nous explique les enjeux de la recherche sur les neutrinos.

POUR LA SCIENCE

Pouvez-vous nous expliquer les étapes qui ont conduit à introduire le concept d'oscillation des neutrinos ?

MARCO ZITO : L'hypothèse de l'existence des neutrinos a été émise en 1930 par le physicien Wolfgang Pauli. Ces particules n'interagissent que très peu avec la matière et sont donc difficiles à détecter. Il a fallu plus d'une vingtaine d'années pour confirmer leur existence, grâce à une expérience utilisant

le cœur d'une centrale nucléaire, aux États-Unis, comme source de neutrinos.

Les physiciens se sont aussi intéressés aux neutrinos produits par le Soleil. Une de ces expériences, *Homestake*, ne détectait qu'un neutrino par jour au lieu de trois prévus par les modèles qui décrivent l'activité du Soleil. Une explication était proposée par le physicien italien Bruno Pontecorvo : l'« oscillation » des neutrinos.

PLS

De quoi s'agit-il ?

M. Z. : Il existe trois types, ou « saveurs », de neutrinos, associés à trois particules chargées, l'électron, le muon et le tau. Un neutrino peut changer spontanément de saveur au cours du temps : c'est l'« oscillation ». La théorie l'explique en définissant trois états de neutrinos, chacun associé à une masse. Les trois états de saveur et les trois états de masse sont différents, mais ils sont reliés suivant certains principes de la physique quantique. Chaque état de saveur correspond à une certaine combinaison des états de masse.

Or chaque état de masse est décrit par une onde ayant sa propre fréquence. Dès

lors, si un neutrino électronique émis par le Soleil, par exemple, vole vers la Terre, sa combinaison varie avec le temps. Les trois états de masse, dont les fréquences diffèrent légèrement, se déphasent, ce qui fait varier la saveur. Pour les autres particules fondamentales, les fréquences sont trop différentes pour permettre le phénomène d'oscillation.

PLS

Quand le phénomène d'oscillation des neutrinos a-t-il été confirmé ?

M. Z. : L'expérience *Homestake* présentait un déficit de neutrinos solaires ; d'autres expériences avaient noté une anomalie dans les neutrinos atmosphériques (des neutrinos produits par la collision de rayons cosmiques, surtout des protons de haute énergie, avec l'atmosphère terrestre). En 1998, l'expérience japonaise *Super-Kamiokande* a montré, grâce à l'analyse menée par Takaaki Kajita, que le déficit en neutrinos atmosphériques venant d'au-dessus du détecteur différait de celui associé aux neutrinos provenant de l'antipode et qui traversaient toute la Terre. C'était un indice de l'oscillation des neutrinos, la différence étant due aux distances inégales parcourues par les neutrinos atmosphériques.

Jusque-là, les expériences étudiant les neutrinos solaires étaient uniquement sensibles aux neutrinos électroniques. L'expérience *Sudbury Neutrino Observatory* (SNO), dirigée par Arthur McDonald, était sensible à toutes les saveurs. En 2001, les physiciens de cette expérience ont montré que le flux de neutrinos solaires était bien celui attendu par la théorie et qu'un tiers des neutrinos avaient une saveur électronique. Le prix Nobel 2015 récompense ces deux expériences.

PLS

Une nouvelle génération d'expériences étudie les oscillations ; qu'ont-elles découvert ?

M.Z. : Pour exprimer le lien entre les états de saveur et les états de masse des neutrinos, les physiciens utilisent une matrice qui dépend des masses et de trois paramètres nommés angles de mélange. L'étude des neutrinos solaires et des neutrinos atmosphériques a permis de mesurer deux des angles. Le troisième a été mesuré à partir de 2011 par l'expérience T2K, au Japon, puis avec grande précision par *Daya Bay*, en Chine.

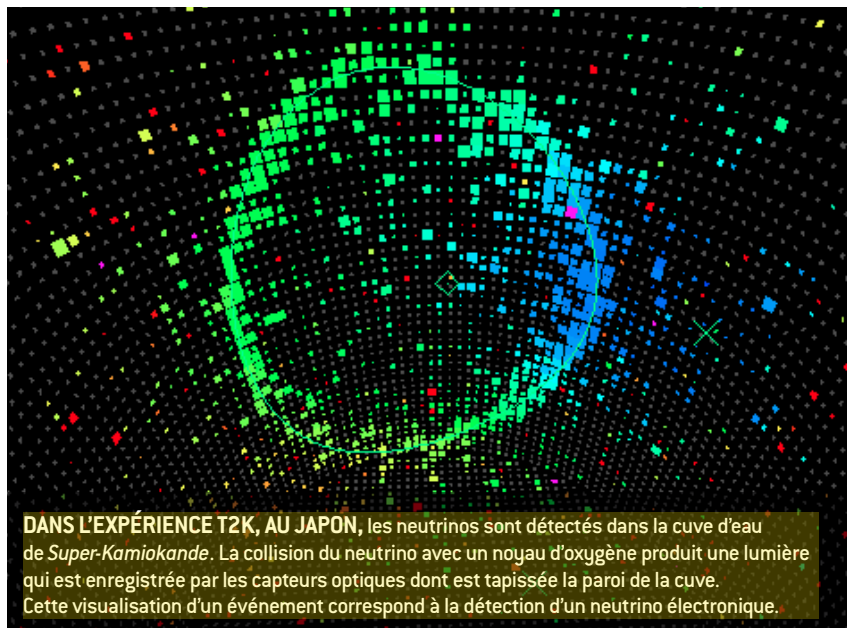
La matrice contient un dernier paramètre, qui, s'il est non nul, implique des différences dans la façon d'osciller des neutrinos et des antineutrinos. Il faudra peut-être attendre de futures expériences, telles *Hyper-Kamiokande*, au Japon, ou *DUNE*, aux États-Unis, pour mesurer ce paramètre.

PLS

Et qu'en est-il de la masse des neutrinos ?

M.Z. : C'est le sujet qui motive particulièrement la communauté des physiciens du domaine. La mesure directe de la masse des neutrinos est très difficile. L'expérience KATRIN, en Allemagne, devrait atteindre une sensibilité de deux dixièmes d'électronvolt, mais les neutrinos sont peut-être plus légers.

Ce que nous savons le mieux mesurer aujourd'hui, c'est la différence de masse entre deux types de neutrinos. Cependant, sur les trois masses, nous avons un problème de hiérarchie : nous ne savons pas si nous avons deux neutrinos très légers et un légèrement plus lourd, ou un très léger et



DANS L'EXPÉRIENCE T2K, AU JAPON, les neutrinos sont détectés dans la cuve d'eau de *Super-Kamiokande*. La collision du neutrino avec un noyau d'oxygène produit une lumière qui est enregistrée par les capteurs optiques dont est tapissée la paroi de la cuve. Cette visualisation d'un événement correspond à la détection d'un neutrino électronique.

Collaboration T2K

deux plus lourds. L'expérience NOvA, aux États-Unis, est similaire à T2K si ce n'est que la source et le détecteur sont distants de 800 kilomètres, au lieu de 290 kilomètres pour T2K. Sur une telle distance, les deux hiérarchies possibles se distingueraient par des différences dans les oscillations.

La question de la masse des neutrinos pose aussi des problèmes théoriques qui ouvrent une fenêtre sur la physique au-delà du modèle standard de la physique des particules. Elle requiert peut-être l'introduction de neutrinos, dits stériles, qui n'interagissent pas du tout avec la matière.

La connaissance des masses des neutrinos est cruciale en cosmologie, car elles pourraient aussi jouer un rôle sur la formation des grandes structures (galaxies et amas de galaxies). Et le neutrino intervient aussi dans des scénarios expliquant pourquoi l'Univers est constitué de matière alors qu'il a probablement débuté avec des quantités égales de matière et d'antimatière.

La recherche sur les neutrinos est en pleine effervescence. Les progrès ont été lents, mais ils ont à chaque fois conduit à une découverte. Les années à venir nous promettent encore de belles choses.

Propos recueillis par Sean BAILLY

■ BIBLIOGRAPHIE

M. Zito, *Dans le tourbillon des particules*, Belin, 2015.

M. Hirsch et al., *Les neutrinos, messagers de l'inconnu*, *Pour la Science*, n° 431, septembre 2013.

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

A. McDonald et al., *L'énigme des neutrinos solaires résolue*, *Pour la Science*, n° 312, octobre 2003.

■ À ÉCOUTER

Le jeudi 11 février 2016, de 16h à 17h, Marco Zito reviendra sur les enjeux de la recherche sur les neutrinos dans l'émission *La marche des sciences* sur *France Culture*. www.franceculture.com

Du GÉNIE par accident

Darold Treffert

Il arrive qu'un traumatisme crânien, un accident vasculaire cérébral ou une maladie neurodégénérative fasse surgir un étonnant don artistique ou intellectuel. Le génie serait-il à la portée de chacun ?