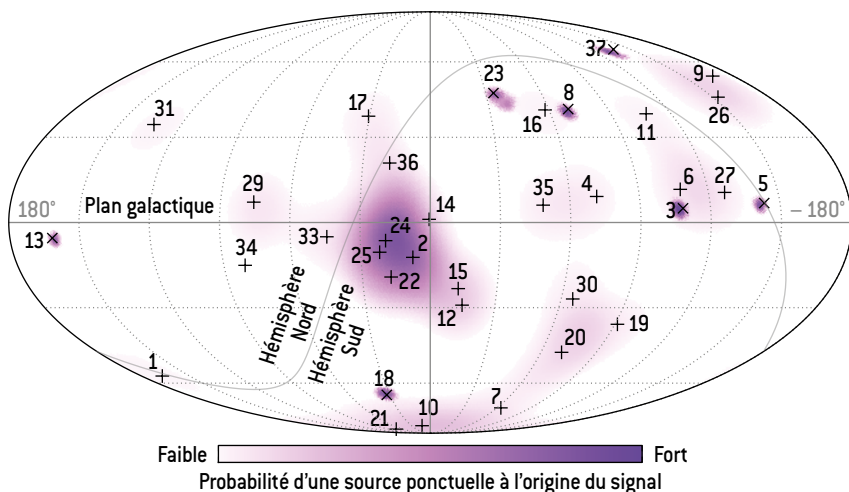




LA CARTE DES NEUTRINOS de haute énergie établie par *IceCube* répertorie la provenance des particules (qui sont numérotées). On note une accumulation de neutrinos proche du centre galactique. L'intensité de la couleur violette reflète la probabilité qu'une source ponctuelle soit à l'origine du signal. Certains neutrinos, très éloignés du plan galactique, sont originaires d'au-delà de la Voie lactée.

détecteur observe aussi des neutrinos produits localement par les rayons cosmiques, à raison de un toutes les six minutes. Ces neutrinos sont produits par l'interaction de rayons cosmiques avec des noyaux d'hydrogène ou d'oxygène de l'atmosphère terrestre. Mais parce qu'ils sont créés dans notre voisinage, ces neutrinos ne nous apprennent rien sur la nature des rayons cosmiques ou d'autres phénomènes astrophysiques. Nous devons donc filtrer ces importuns pour détecter les neutrinos cosmiques. L'expérience nous a appris à reconnaître les motifs lumineux produits par les neutrinos atmosphériques, et nous savons donc les ignorer.

Ainsi, nous pouvons être certains que les neutrinos dotés d'une énergie de l'ordre du PeV vus par *IceCube* proviennent des profondeurs du cosmos. Ils pourraient provenir des mêmes sources que les rayons cosmiques, comme nous l'avons vu, mais d'autres explications, plus exotiques, sont possibles. Comme le fait que les neutrinos soient liés à la matière noire, cette composante invisible et de nature inconnue qui constituerait plus de 80 % de toute la matière du cosmos. L'idée serait plausible si la matière noire était constituée de particules très lourdes ayant une durée de vie moyenne supérieure à l'âge actuel de l'Univers. Dans un tel scénario, les particules de matière noire pourraient de temps à autre se désintégrer et produire les neutrinos énergétiques que nous observons. Il est donc crucial de traquer la source des neutrinos pour tester les diverses hypothèses.

■ BIBLIOGRAPHIE

S. Adrián-Martínez *et al.*, **First combined search for neutrino point-sources in the Southern hemisphere with the Antares and IceCube neutrino telescopes**, soumis à *ApJ*, en ligne, arXiv:1511.02149, 2015.

M. G. Aartsen *et al.*, **Observation of high-energy astrophysical neutrinos in three years of IceCube data**, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 113, n° 10, article n° 101101, 2014.

G. Gelmini *et al.*, **Des neutrinos pour mieux voir**, *Pour la Science*, n° 394, août 2010.

Avant la découverte des neutrinos dans la gamme du PeV, la recherche de neutrinos cosmiques par *IceCube* s'était presque exclusivement cantonnée à l'une des trois saveurs de neutrinos : les neutrinos muoniques (les deux autres étant les neutrinos électroniques et tauiques). Les physiciens s'attendent à ce que les neutrinos cosmiques soient à peu près également répartis entre les trois saveurs au moment où ils arrivent sur Terre, mais certains sont plus faciles à repérer à cause du signal qu'ils produisent dans notre détecteur.

Nous avons initialement optimisé *IceCube* pour traquer les neutrinos muoniques ; en percutant des atomes, ces particules produisent des traînées lumineuses de 1 kilomètre de long, qui traversent une grande partie du détecteur. Cette technique nous permet en quelque sorte de rendre notre zone de « collecte » des neutrinos plus grande que le volume réel du détecteur, en l'étendant à des neutrinos qui interagissent un peu en dehors du dispositif. Mais elle ouvre aussi la porte à une plus grande contamination de particules autres que les neutrinos cosmiques, et nous devons prendre des mesures supplémentaires pour filtrer ce fond.

Des neutrinos jamais détectés

Nous nous sommes aussi intéressés à une tout autre classe de neutrinos d'énergie extrêmement élevée, les neutrinos dits de Greisen-Zatsepin-Kuzmin (GZK), qui se forment lors de l'interaction de rayons cosmiques avec des photons du fond diffus cosmologique, un vestige du Big Bang. De tels neutrinos auraient des énergies dans la plage des exaélectronvolts ($1 \text{ EeV} = 10^{18} \text{ eV}$). Cette seconde étude se recentrait sur une région plus limitée d'*IceCube*, à savoir la partie centrale du détecteur (environ la moitié du volume total), ce qui laissait moins de place à la contamination. Le grand avantage de confiner la recherche de cette manière est que le détecteur peut mesurer l'énergie complète déposée par chaque neutrino dans la glace avec une exactitude de 10 à 15 %, ce qui est nettement mieux que les mesures que nous pouvons faire sur les neutrinos interagissant à l'extérieur du détecteur. Nous pouvons aussi identifier les neutrinos des trois saveurs plutôt que restreindre la recherche à la variété muonique.

Depuis la découverte d'Ernie et de Bert, nous avons appliqué les deux méthodes

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 d'*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