

nouvelles données pour confirmer ou écarter ces hypothèses. Première source probable des rayons cosmiques: la mort d'étoiles massives. À la fin de sa vie, quand son cœur n'est plus en mesure de supporter sa masse, une grosse étoile s'effondre sur elle-même en un objet dense, tels une étoile à neutrons ou un trou noir. L'effondrement s'accompagne d'une explosion très brillante (une supernova). Pendant ce processus, une grande part de l'énergie gravitationnelle de la matière qui tombe vers le centre de l'astre est convertie en une poussée qui accélère des particules, sans doute sous la forme d'ondes de choc.

Les vestiges de supernovæ ont été proposés comme source probable de rayons cosmiques dès 1943 par les astronomes Walter Baade et Fritz Zwicky; soixante-dix ans

plus tard, l'hypothèse est toujours débattue. Environ trois explosions de supernovæ par siècle dans la Voie lactée suffiraient pour expliquer le flux constant de rayons cosmiques observé dans la Galaxie.

Les rayons cosmiques extragalactiques, qui, comme leur nom l'indique, ont leur origine en dehors de la Voie lactée, sont en général plus énergétiques que les rayons cosmiques issus d'une source plus proche. Cela suppose qu'ils sont produits par des événements encore plus violents que les supernovæ, tels les sursauts gamma. Ces phénomènes, encore plus brillants que les supernovæ classiques, sont encore mal compris; ils se produisent probablement au cours de l'effondrement d'une étoile de très grande masse dans des conditions extrêmes.

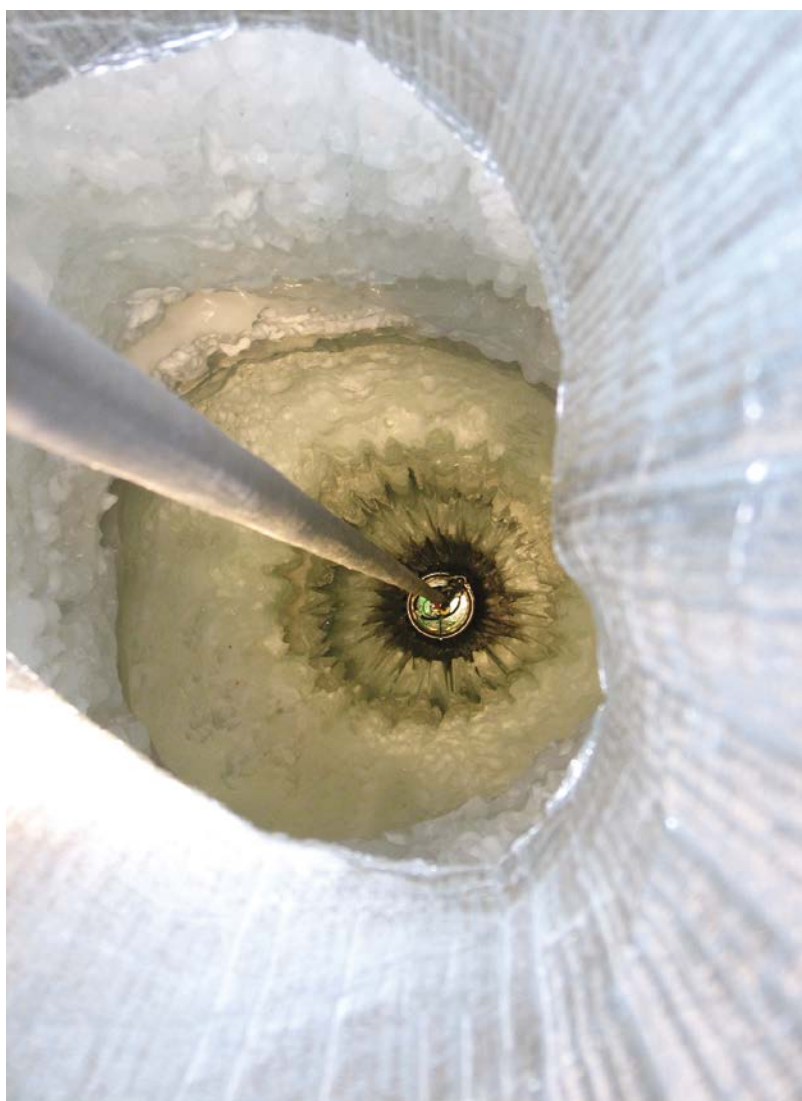
Autre source théorique de rayons cosmiques extragalactiques, les noyaux actifs de galaxies sont une classe de galaxies qui auraient en leur centre un trou noir super-massif où tombent de grandes quantités de matière. Cet environnement extrême entraînerait l'accélération de certaines particules jusqu'à des vitesses assez élevées pour qu'elles s'échappent de la galaxie et deviennent ainsi des rayons cosmiques.

La détection des neutrinos issus de ces processus est un défi pour les physiciens. Pour compenser le fait que ces particules ont une très faible probabilité d'interagir avec la matière, il faut construire des détecteurs gigantesques. L'expérience *IceCube* couvre un volume de près de 1 kilomètre cube. Elle utilise la glace de la calotte antarctique qui est un parfait détecteur naturel de neutrinos. Lorsque, exceptionnellement, un neutrino interagit avec un atome de la glace, celle-ci s'illumine en libérant une « cascade » de particules chargées qui émettent de la lumière bleue. Ce « rayonnement Tcherenkov » parcourt des centaines de mètres à travers la glace pure ultratransparente. Afin de le détecter, les physiciens ont disposé 5 160 capteurs optiques dans tout le volume du détecteur situé à 1 500 mètres au-dessous de la surface du pôle Sud, où la glace est âgée de près de 100 000 ans.

Des cascades de lumière

Les capteurs cartographient avec précision la cascade de lumière produite par les particules créées lorsqu'un neutrino entre en collision. La forme de la cascade révèle le type (on parle de « saveur ») du neutrino, son énergie et la direction d'où il provient. Les énergies d'Ernie, Bert et tous les autres neutrinos que nous avons vus jusqu'à présent étaient de l'ordre du pétaélectronvolt (PeV), soit 10^{15} électronvolts (eV), ce qui en fait les neutrinos les plus énergétiques jamais observés. Ernie et Bert avaient des énergies respectives de 1,07 PeV et de 1,24 PeV; ils ont produit des cascades de lumière (d'environ 100 000 photons) longues de plus de 500 mètres. Par comparaison, l'énergie des particules accélérées par le LHC (le grand collisionneur de hadrons du Cern) près de Genève, est de l'ordre du téraélectronvolt (TeV), soit 10^{12} eV, donc trois ordres de grandeur plus faible.

Les neutrinos enregistrés par *IceCube* ont une énergie si grande qu'ils proviennent certainement d'une source cosmique. Le



Avec l'aimable autorisation de Jim Haugen/IceCube/NSF

ENFOUI À ENVIRON 1 500 MÈTRES sous la surface de la calotte glaciaire de l'Antarctique, Le détecteur *IceCube* comprend 86 rangées de capteurs. Pour installer chaque rangée, il a fallu la faire descendre dans un trou creusé par une perforatrice à injection d'eau chaude.

Un télescope à neutrinos dans la mer Méditerranée

La découverte par *IceCube* de neutrinos cosmiques de haute énergie a véritablement révélé l'intérêt de l'astronomie fondée sur les neutrinos. Elle n'est cependant pas la seule expérience dans ce domaine. D'autres, telles *Antares* ou *KM3NeT*, sont installées dans la mer Méditerranée.

Le télescope *IceCube* utilise la calotte antarctique comme milieu de détection, mais d'autres projets ont considéré l'eau du fond des océans dont les propriétés optiques (notamment une diffusion de la lumière plus faible) offrent un meilleur pouvoir de pointage de la direction du neutrino que la glace. Dans les années 1980, les physiciens du projet américain *Dumand* ont tenté d'installer un détecteur au large de Hawaï, dans l'océan Pacifique, mais l'immersion dans les grands fonds était trop complexe.

En Europe, dans les années 1990, la collaboration *Antares* a repris le flambeau en proposant le déploiement d'un télescope sous-marin au large des côtes varoises, par 2500 mètres de fond. Achievé en 2008, le détecteur comprend 12 lignes de détection de 450 mètres de haut (voir la figure, à gauche). Le volume de détection est bien inférieur à celui d'*IceCube*; pourtant, les résultats d'*Antares* ont servi à réduire l'incertitude sur l'origine des neutrinos enregistrés par *IceCube*. En effet, le volume effectif d'*Antares*, pour les neutrinos muoniques, est similaire à celui d'*IceCube* pour les neutrinos électroniques, mais *Antares* offre une meilleure résolution angulaire. Ainsi, l'analyse des données a permis d'exclure que l'accumulation d'événements proches du centre galactique (voir la figure page 30) puisse provenir d'une source unique.

Les deux expériences sont ainsi complémentaires et l'équipe d'*Antares* compte établir de nouvelles limites sur les autres saveurs de neutrinos

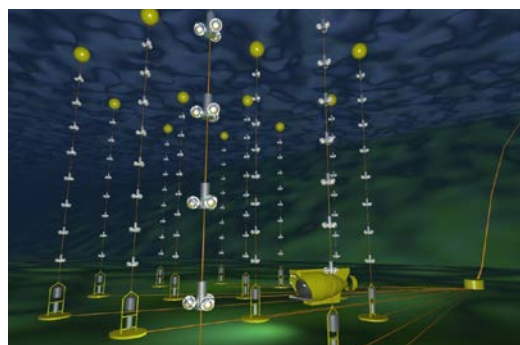
pour lesquels la résolution angulaire est inférieure à 3 degrés (à comparer à 15 degrés dans la glace).

Antares fournit aussi des informations quant à la nature des sources qui produisent les neutrinos les plus énergétiques détectés par *IceCube* (Ernie, Bert et Big Bird). Ainsi, certains noyaux actifs de galaxies connus pourraient être des sources, mais davantage de données seront nécessaires pour confirmer cette hypothèse.

la coïncidence s'est malheureusement révélée fortuite!

Il faudra peut-être attendre la construction d'un détecteur plus grand dans la mer Méditerranée pour identifier les sources. Forte du succès d'*Antares*, la construction d'un tel détecteur a d'ores et déjà débuté. Le successeur, *KM3NeT*, comporte deux sites: l'un (*KM3NeT/Arca*), au sud de la Sicile, est optimisé pour la détection de neutrinos cosmiques avec un volume instrumenté de plusieurs kilomètres cubes; l'autre (*KM3NeT/Orca*), proche de celui d'*Antares*, est consacré à la mesure des propriétés des neutrinos. Ce dernier aura un maillage de photodétecteurs plus dense afin d'abaisser le seuil de détection en énergie au

électrons émis dans la désintégration radioactive du potassium 40, mais aussi par la bioluminescence des organismes marins. Cette dernière composante varie lentement en fonction des conditions environnementales (température, intensité des courants) qui intéressent au premier chef les biologistes. À l'instar d'*Antares*, *KM3NeT* sera un observatoire pluridisciplinaire abritant aussi des sismographes et des capteurs de pression intégrés dans les réseaux nationaux d'alertes aux séismes et aux tsunamis. Des capteurs acoustiques permettront le recensement et la surveillance des déplacements des populations des cétacés. Les capteurs



L'EAU PROFONDE de la Méditerranée est le milieu de détection des expériences *ANTARES* (à gauche) et *KM3NeT*. Celle-ci, en cours d'installation, sera équipée de modules optiques améliorés (à droite).

Une autre stratégie pour identifier les sources de neutrinos consiste à rechercher des neutrinos en coïncidence spatiale ou temporelle avec d'autres messagers cosmiques tels que les rayons gamma ou les rayons cosmiques d'ultra-haute énergie. Cette approche multimessagers est activement poursuivie par *Antares*. Le dernier exemple en date était l'alerte lancée à la communauté des astrophysiciens le 1^{er} septembre 2015 après l'observation d'un candidat neutrino de haute énergie suivie d'une activité intense en rayons X dans le même champ de vue. Après une étude plus poussée,

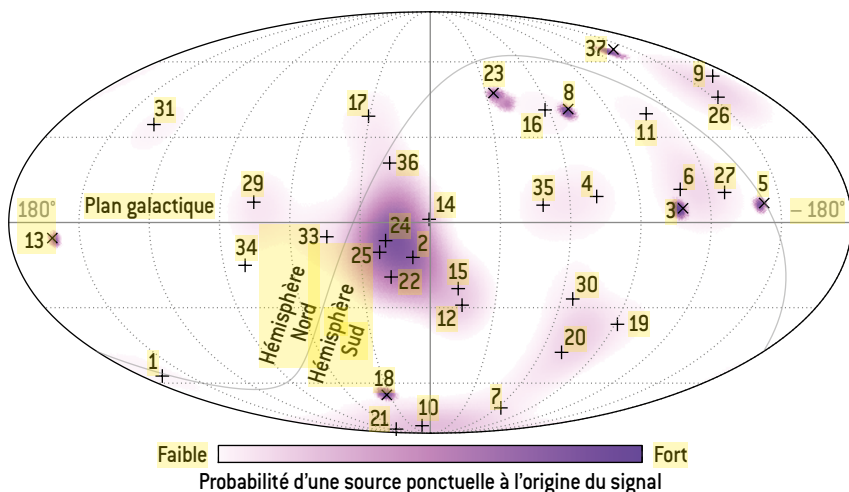
gigaélectronvolt. La première ligne a été immergée avec succès le 3 décembre 2015, et la construction pourrait être achevée à l'horizon de 2020.

Les modules optiques de *KM3NeT* comportent 31 petits photomultiplicateurs (voir la figure, à droite) au lieu d'un seul, plus grand, dans les modules d'*Antares* et d'*IceCube*. Les avantages sont nombreux: une plus grande surface de collecte, une meilleure directionnalité, un meilleur comptage des photons et donc une plus grande aptitude à rejeter le bruit de fond optique. Dans les abysses, ce dernier est principalement constitué de photons engendrés par les

physico-chimiques (O_2 , CO_2 , température et radioactivité) fourniront des mesures de variations sur de longues périodes reliées au changement climatique global.

Par ailleurs, les télescopes à neutrinos créent des ponts entre l'astronomie et la physique des particules. Ils pourront étudier les neutrinos produits dans l'atmosphère lors des bombardements de rayons cosmiques et apporter des informations sur la hiérarchie des masses des neutrinos, un paramètre fondamental encore inconnu (voir l'entretien avec Marco Zito, pages 32 et 33).

— **Antoine Kouchner**
APC, université Paris-Diderot



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