

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.

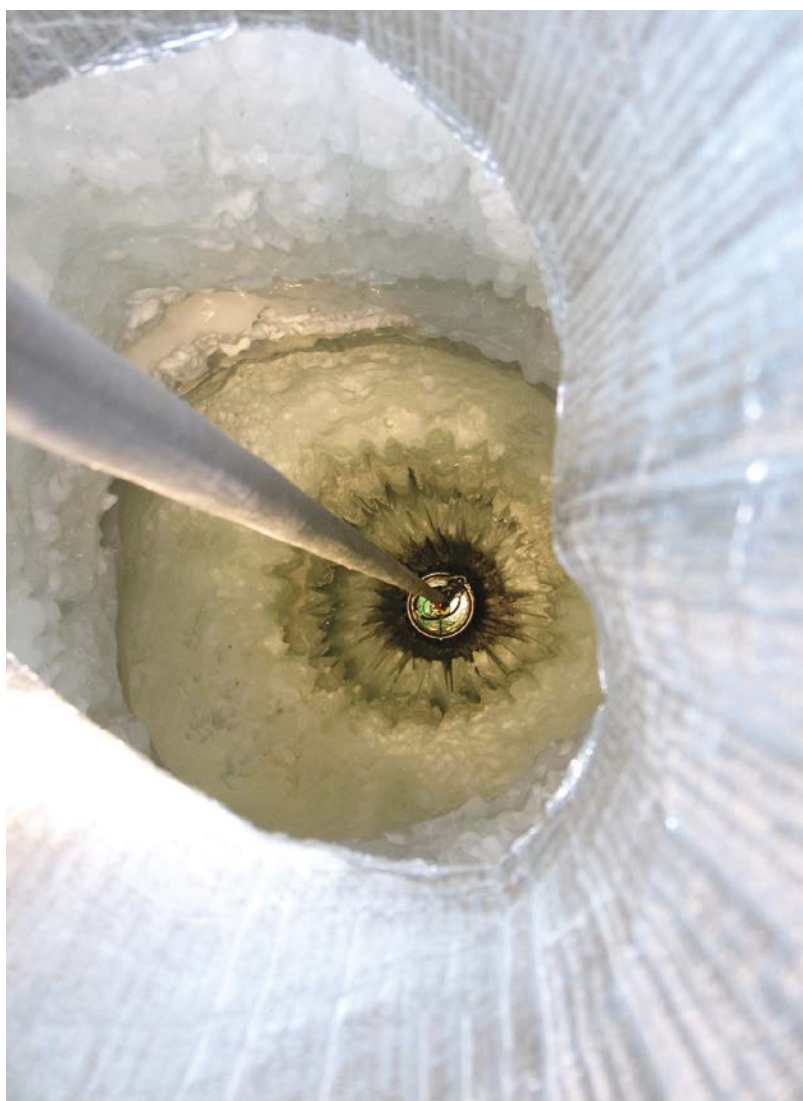
Autre source théorique de rayons cosmiques extragalactiques, les noyaux actifs de galaxies sont une classe de galaxies qui auraient en leur centre un trou noir super-massif où tombent de grandes quantités de matière. Cet environnement extrême entraînerait l'accélération de certaines particules jusqu'à 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

ENFOUÏ 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.