

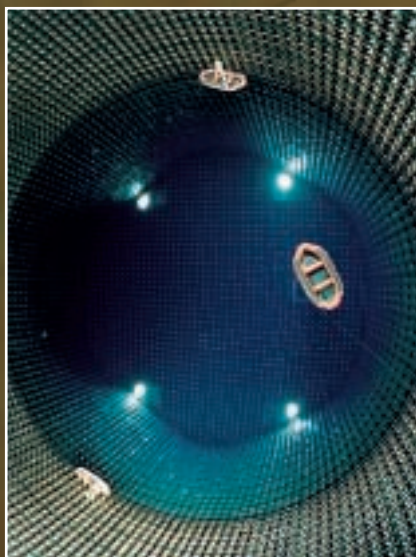
Le malheur des uns fait parfois le bonheur des autres. Le dicton vient de s'appliquer en physique. Le malheur, c'était un «bruit de fond», c'est-à-dire une réaction indésirable. Le bonheur, c'était une information importante sur le fonctionnement de l'Univers. L'histoire a commencé il y a environ 20 ans, quand plusieurs groupes de physiciens ont entrepris de distinguer la désintégration radioactive du proton, un signal excessivement rare (si tant est qu'il existe), du bruit de fond des réactions déclenchées par des particules insaisissables nommées neutrinos.

Le proton, l'un des principaux constituants des atomes, semble éternel, mais la théorie actuelle prévoit qu'il se désintégrerait en 10^{32} ans. L'observation de sa désintégration corroborerait les théories de grande unification, dont de nombreux physiciens estiment qu'elles généralisent le très fécond Modèle standard de la physique des particules. Afin d'observer cette désintégration, les physiciens ont installé de gigantesques détecteurs dans les profondeurs de la Terre, dans des mines ou dans des tunnels, où ils échappent à la pluie permanente des rayons cosmiques, des particules qui perturbent

les mesures. Toutefois, quelle que soit la profondeur à laquelle on les installait, ces détecteurs restaient exposés aux neutrinos produits dans les interactions des rayons cosmiques.

La première génération de ces détecteurs, exploitée entre 1980 et 1995, n'enregistra aucun indice de désintégration de protons. En revanche, les physiciens découvrirent que le bruit de fond des neutrinos, prétendument banal, n'était pas si facile à comprendre. L'une de ces expériences, nommée *Kamiokande*, fut installée dans le petit village minier de Kamioka, au Japon, à 250 kilomètres de Tokyo. Tout comme

1. LE DÉTECTEUR SUPER-KAMIOKANDE est installé dans une mine de zinc en activité, sous le mont Ikenoyama, au Japon. Sa cuve en acier inoxydable contient 50 000 tonnes d'une eau ultra-pure, si transparente que la lumière parcourt 70 mètres avant de perdre la moitié de son intensité (dans une piscine ordinaire, cette distance se réduit à quelques mètres). Cette eau est surveillée par 11 000 photomultiplicateurs qui tapissent les parois de la cuve. Chaque photomultiplicateur est une ampoule de verre de 50 centimètres de diamètre, soufflée à la main, couverte à l'intérieur d'une mince pellicule de métal alcalin, et au sein de laquelle on a fait le vide. Ces ampoules enregistrent les éclairs de lumière Tcherenkov, qui signalent les rares collisions d'un neutrino de haute énergie avec un noyau atomique de l'eau. Le cartouche ci-contre montre des techniciens, à bord de canots pneumatiques, en train de nettoyer les ampoules lors d'une opération de remplissage de la cuve.



Institute for Cosmic Ray Research (ICRR), University of Tokyo

l'expérience IMB, située dans une mine de sel près de Cleveland, des détecteurs sensibles placés dans de l'eau ultra-pure guettaient l'éclair révélateur d'une désintégration de proton.

Comme une aiguille dans une botte de foin, un tel éclair aurait été dissimulé parmi des milliers d'éclairs semblables, engendrés par les interactions des neutrinos et des noyaux atomiques de l'eau. L'analyse ne trouva aucune désintégration de proton, mais elle livra un trésor : une preuve de l'instabilité des neutrinos, de leur transformation au cours de leur propagation.

Les neutrinos sont des particules étonnantes. Chaque seconde, 60 milliards d'entre eux, provenant pour la plupart du Soleil, traversent chaque centimètre carré de n'importe quel corps à la surface de la Terre. Cependant, comme ils interagissent rarement avec les autres particules, la quasi-totalité de ces 60 milliards de neutrinos

passent sans même effleurer un seul atome. Si l'on envoyait un tel faisceau de neutrinos sur un bloc de plomb d'une année-lumière d'épaisseur, les particules ressortiraient presque toutes sans avoir interagi au cours de la traversée. Un détecteur aussi grand que celui de *Kamiokande* ne capte qu'une infime fraction des neutrinos qui le traversent chaque année.

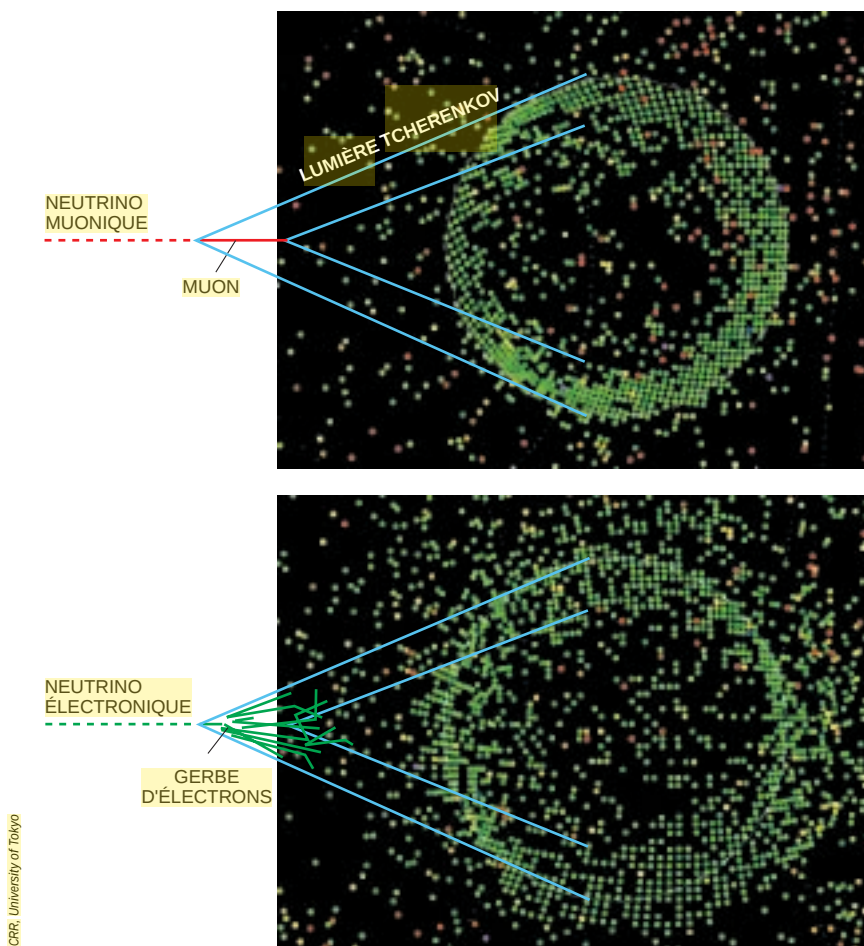
Il existe trois types, ou « saveurs », de neutrinos, qui correspondent à leurs trois partenaires chargés du Modèle standard : l'électron et ses cousins plus lourds, le muon et la particule tau. Un neutrino électronique interagissant avec un noyau atomique produit un électron ; dans les mêmes interactions, un neutrino muonique engendre un muon, et un neutrino tauique un tau. Depuis leur découverte, voici plus de 60 ans, ces particules semblaient dépourvues de masse. Toutefois, si elles changent de saveur au cours du temps, la théorie quantique

indique qu'elles possèdent très probablement une masse. Dans cette hypothèse, les neutrinos de l'Univers auraient, à eux tous, une masse supérieure à celle de toutes les étoiles de l'Univers.

La construction d'un piège géant

Souvent, la physique des particules progresse en construisant des machines de plus en plus grosses. Ce fut ici le cas : on a construit le détecteur *Super-Kamiokande* sur les mêmes plans que *Kamiokande*, mais en décuplant les dimensions (voir la figure 1) : un ensemble de photomultiplicateurs est pointé vers 50 000 tonnes d'eau, dont les protons peuvent se désintégrer ou être heurtés par des neutrinos. Dans chacun de ces cas, la réaction crée des particules qu'on détecte par un éclair bleuté de lumière Tcherenkov. Cette lumière doit son nom à Pavel Tcherenkov, qui a compris en 1934 qu'elle était l'analogue optique du bang supersonique. De même qu'un avion supersonique engendre une onde de choc sonore, une particule électriquement chargée (par exemple, un électron ou un muon) émet un rayonnement Tcherenkov lorsque sa vitesse est supérieure à celle de la lumière dans le milieu traversé. La théorie de la relativité n'est pas violée : la vitesse maximale c qu'elle impose à tout mouvement est celle de la vitesse de la lumière dans le vide. Or, dans l'eau, la vitesse de la lumière n'est égale qu'au trois-quarts de c ; des particules très énergétiques peuvent donc aller plus vite que la lumière. Dans un tel cas, un cône de lumière centré sur la trajectoire des particules est émis.

Dans le détecteur *Super-Kamiokande*, les particules chargées de l'énergie qui nous intéresse ne parcourent généralement que quelques mètres, et le cône Tcherenkov projette un anneau de lumière sur la paroi tapissée de photomultiplicateurs (voir la figure 2). La taille, la forme et l'intensité de cet anneau lumineux révèlent les propriétés de la particule chargée. Puis l'analyse de cette particule renseigne sur le type de neutrino qui l'a engendrée. Par exemple, on distingue les motifs Tcherenkov qui proviennent des électrons de ceux issus des muons : les électrons engendrent une gerbe de particules, dessinant un anneau flou, différent du cercle plus net engendré par les muons. L'analyse de cette



2. LORSQU'UN NEUTRINO DE HAUTE ÉNERGIE percute un noyau atomique et crée une particule chargée, celle-ci émet un cône de lumière Tcherenkov. Un neutrino muonique (*en haut*) crée un muon qui parcourt environ un mètre en projetant sur les détecteurs un anneau lumineux bien défini. Un électron créé par un neutrino électronique (*en bas*) engendre une petite gerbe d'électrons et de positons qui créent chacun leur propre cône de lumière Tcherenkov : l'anneau lumineux résultant est plus flou. Les points verts indiquent des éclairs détectés dans un même infime intervalle de temps.