

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.

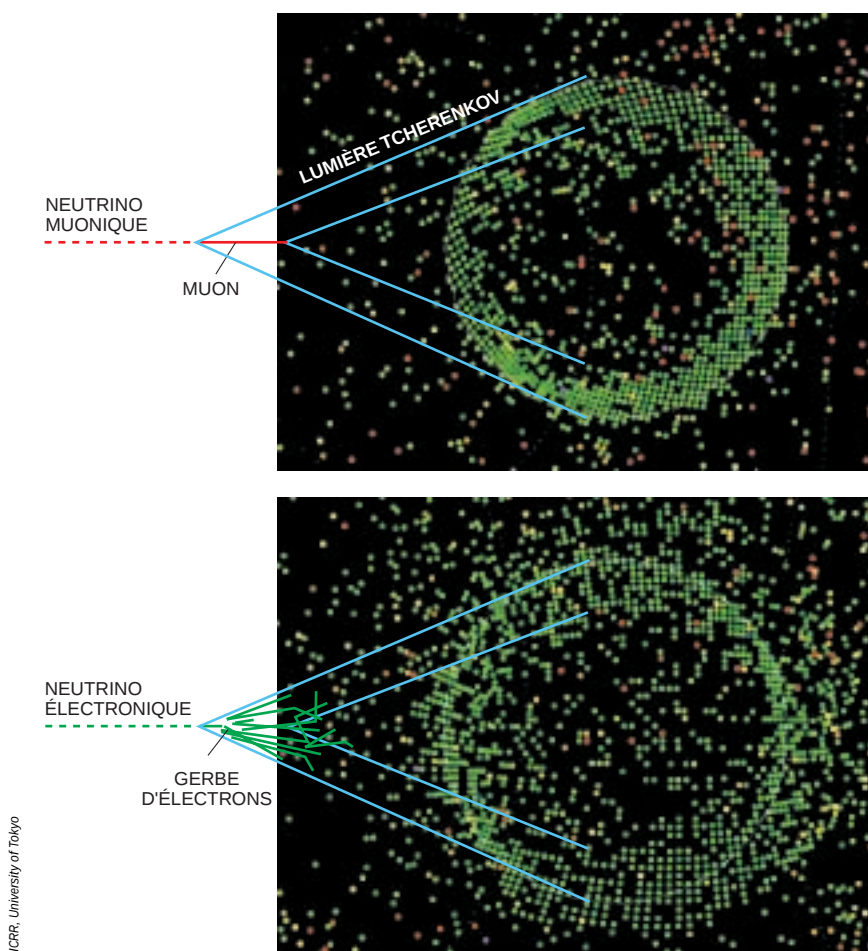
Il existe trois types, ou « saveurs », de neutrinos, qui correspondent à leurs trois partenaires chargés du Modèle standard : l'électron et ses cousins plus lourds, le muon et la particule tau. Un neutrino électronique interagissant avec un noyau atomique produit un électron ; dans les mêmes interactions, 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.

lumière indique également l'énergie et la direction de l'électron ou du muon incident, qui sont relativement proches de celles du neutrino initial.

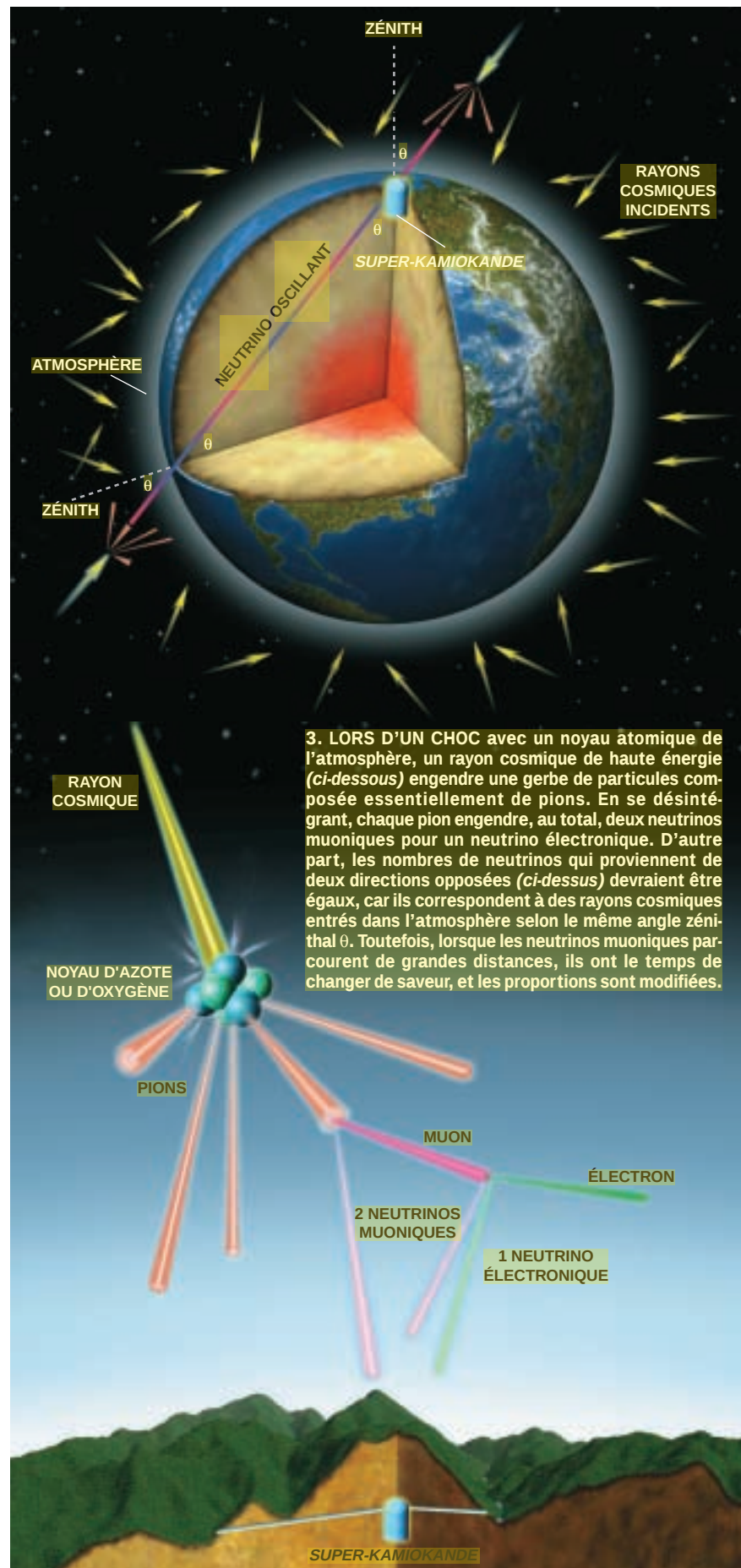
En revanche, l'expérience identifie moins facilement le troisième type de neutrino : le neutrino tauique. Un tel neutrino n'interagit avec un noyau et ne produit une particule tau que s'il a suffisamment d'énergie : le tau est environ 3 500 fois plus lourd qu'un électron (le muon, lui, est seulement 200 fois plus massif qu'un électron). Si les neutrinos produits dans l'atmosphère ont suffisamment d'énergie pour engendrer une particule de la masse du muon, seule une infime partie d'entre eux peut créer des tau. La plupart des neutrinos tauiques créés dans l'atmosphère traversent le détecteur *Super-Kamiokande* sans être détectés.

Après avoir construit notre nouveau détecteur, nous avons compté combien nous voyions de chaque neutrino. Puis nous avons comparé ces nombres aux nombres attendus théoriquement.

L'expérience *Super-Kamiokande* surveille les neutrinos atmosphériques qui se forment dans la pluie de particules déclenchée lorsqu'un rayon cosmique heurte le sommet de notre atmosphère. Ces rayons cosmiques «primaires» sont essentiellement des protons et quelques noyaux plus lourds tels celui d'hélium ou celui de fer. Chaque collision engendre une cascade de particules secondaires, principalement des pions et des muons, qui se désintègrent presque immédiatement en émettant des neutrinos (voir la figure 3). Comme on sait à peu près combien de rayons cosmiques heurtent l'atmosphère chaque seconde et combien de pions et de muons apparaissent lors de chaque collision, on a estimé le nombre de neutrinos attendus.

Jouer avec les quotients

Comme cette estimation n'est qu'à 25 pour cent près, nous utilisons une astuce classique en science : nous utilisons plutôt le quotient de deux grandeurs, plus précisément connu que les deux grandeurs prises individuellement. Dans nos études, la réaction clé est la désintégration d'un pion en un muon et en un neutrino muonique, suivie de la désintégration du muon en un électron, en un neutrino électronique et en un autre neutrino muonique. Quel que soit le nombre de rayons cosmiques qui pénètrent dans



1930



AIP Emilio Segrè Visual Archives

Wolfgang Pauli sauve le principe de conservation de l'énergie en postulant l'existence d'une particule nouvelle, emportant avec elle l'énergie manquante dans certaines désintégrations radioactives.

1933

Enrico Fermi formule la théorie de la désintégration bêta en incorporant sa nouvelle particule, qu'il nomme "neutrino", de l'italien "petit neutre".

1956



AIP Emilio Segrè Visual Archives

Frederick Reines (au centre) et Clyde Cowen détectent le neutrino en utilisant le réacteur nucléaire de Savannah River.

1962

À Brookhaven, le premier faisceau de neutrinos produit par accélérateur montre l'existence d'une différence entre les neutrinos électroniques et les neutrinos muoniques.

1969



Courtesy of the Institute for Advanced Study, Princeton

Utilisant 600 tonnes d'un solvant organique, enfoui dans une mine à Homestake (Dakota du Sud), Raymond Davis détecte des neutrinos émis par le Soleil.

l'atmosphère terrestre ou le nombre de pions qu'ils produisent, deux neutrinos muoniques sont émis pour un neutrino électronique. Le calcul fait intervenir des simulations numériques de pluies de rayons cosmiques, mais

la proportion des neutrinos muoniques par rapport aux neutrinos électroniques est estimée à cinq pour cent près.

Après avoir enregistré les réactions durant presque deux ans, nous avons constaté que la proportion des neutri-

nos muoniques par rapport aux neutrinos électroniques n'était pas égale à 2, comme prévu, mais à 1,3. Même en modifiant les hypothèses sur les flux de neutrinos, sur leurs interactions avec les noyaux et sur les réactions de nos détecteurs, nous ne pouvions expliquer un quotient aussi faible... à moins de supposer que les neutrinos se transforment.

Pour vérifier cette étonnante conclusion, nous avons examiné d'autres quotients : nous avons comparé le nombre de neutrinos provenant de différentes directions du ciel. Les rayons cosmiques primaires qui frappent l'atmosphère terrestre proviennent quasi uniformément de toutes les directions du ciel. Deux effets seulement perturbent cette uniformité. D'une part, le champ magnétique terrestre dévie certains rayons cosmiques (les moins énergiques) et dépeuple certaines directions d'incidence. D'autre part, les rayons cosmiques qui effleurent tangentiellement la Terre créent des gerbes de particules qui pénètrent peu dans l'atmosphère ; ces gerbes de particules se développent différemment de celles qui sont engendrées par les rayons cosmiques arrivant à la verticale.

Ainsi, si nous «regardons» le ciel dans une certaine direction par rapport à la verticale, puis dans la direction opposée, nous devrions «voir» arriver le même nombre de neutrinos de ces deux directions. Ces deux ensembles de neutrinos sont en effet créés par des rayons cosmiques heurtant l'atmosphère sous un même angle (voir la figure 3). En pratique, on sélectionne des neutrinos suffisamment énergiques (dont les rayons cosmiques parents n'ont donc pas été déviés par le champ magnétique terrestre), puis on divise le nombre de neutrinos ascendants par le nombre de neutrinos descendants. Si aucun neutrino n'a changé

Autres mystères, autres possibilités

Les physiciens disposent de divers indices sur les oscillations de neutrinos et ils ont encore plusieurs mystères à élucider. Durant plus de 30 ans, des expériences ont détecté quelques-uns des neutrinos électroniques engendrés lors des réactions de fusion nucléaire qui se déroulent à l'intérieur du Soleil. Ces expériences ont toujours recensé moins de neutrinos que ne le prévoyaient les meilleurs théories (voir *Où sont les neutrinos solaires ?*, par John Bahcall, in *Pour la Science*, juillet 1990). L'expérience *Super-Kamiokande*, qui a également compté ces neutrinos solaires, n'en a trouvé que la moitié. Nous étudions actuellement ces données, en espérant y trouver une signature claire des oscillations de neutrinos. En mai 1998, l'Observatoire à neutrinos de Sudbury, dans l'Ontario, a décelé ses premiers neutrinos. Son détecteur renferme 1 000 tonnes d'eau lourde, ce qui renforce considérablement sa capacité à repérer les neutrinos solaires. D'autres détecteurs seront bientôt opérationnels.

Une expérience effectuée au Laboratoire américain de Los Alamos fournit d'autres indices en faveur de l'oscillation des neutrinos : elle détecte les neutrinos électroniques émis par une source censée produire uniquement des neutrinos muoniques. Le signal est difficile à extraire du bruit de fond. Le résultat, non encore confirmé de manière indépendante, est en cours de vérification par plusieurs expériences. Très récemment, l'expérience européenne KARMEN a infirmé ce résultat.

Si les oscillations entre les neutrinos muoniques et les neutrinos tauiques sem-

blent être l'explication la plus naturelle aux données recueillies par le détecteur *Super-Kamiokande*, d'autres interprétations sont possibles. Le scénario d'oscillation le plus général inclut un mélange des trois saveurs de neutrinos. Les données du détecteur *Super-Kamiokande* sont compatibles avec quelques oscillations entre les neutrinos électroniques et muoniques aux énergies couvertes par ce détecteur. Toutefois, les résultats d'une expérience réalisée à la centrale nucléaire de Chooz, dans les Ardennes, limitent grandement le nombre d'oscillations des neutrinos électroniques pouvant survenir dans le détecteur *Super-Kamiokande*.

On peut également imaginer que les oscillations des neutrinos muoniques incluent une saveur de neutrino encore non découverte. Toutefois, les études réalisées au CERN sur le boson Z montrent clairement qu'il n'existe que trois saveurs de neutrinos «actives» (par actives, on entend des saveurs qui participent à l'interaction nucléaire faible). Si elle existait, la quatrième saveur devrait donc être «stérile» et constituer un type de neutrinos ne participant qu'aux interactions gravitationnelles. Certains physiciens apprécient cette idée, car trois faits distincts (les neutrinos solaires, les neutrinos atmosphériques et les données de Los Alamos) n'admettent aucune explication convaincante si l'on se cantonne à attribuer des masses aux seuls neutrinos électroniques, muoniques et tauiques.

D'autres mécanismes d'oscillation, reposant sur des effets plus ésotériques que la masse des neutrinos, ont également été proposés.