

1975-1977

Découverte du quark "bas" et du lepton tau, révélant une troisième génération de quarks et de leptons.

1983

Découverte, au CERN, des bosons W et Z : ce sont les vecteurs de l'interaction faible, responsable des réactions entre neutrinos.

1987

L'astronomie des neutrinos : les expériences IMB et Kamiokande, qui exploraient la désintégration du proton, détectent 19 neutrinos émis il y a 150 000 ans par la supernova 1987A du Grand Nuage de Magellan



David Malin, Anglo-Australien Observatory

1989

La détermination précise, au CERN et au SLAC (Californie), du taux de désintégration du boson Z^0 montre qu'il n'existe que trois familles de neutrinos.

1998

Grâce à l'analyse des neutrinos atmosphériques, le détecteur *Super-Kamiokande* recueille des données qui indiquent l'oscillation des neutrinos.



ICRR

de saveur en cours de route, ce rapport doit être exactement égal à un.

Comme prévu, nous avons mesuré des nombres presque égaux de neutrinos électroniques descendants et ascendants. En revanche, le nombre de neutrinos muoniques ascendants était deux fois inférieur au nombre de neutrinos muoniques descendants. Ce second argument en faveur d'un changement d'identité des neutrinos fournit un indice sur la nature de cette métamorphose. Les neutrinos muoniques ascendants ne peuvent se transformer en neutrinos électroniques, car on ne constate aucun excès de neutri-

nos électroniques ascendants. Reste le neutrino tauique. Une partie des neutrinos muoniques se seraient donc transformés en neutrinos tauiques qui ont traversé *Super-Kamiokande* sans être détectés.

Une saveur volage

Pourquoi les neutrinos changeraient-ils de saveur? Selon la théorie quantique, une particule se déplaçant dans l'espace se comporte à la fois comme une particule et comme une onde : outre ses propriétés, telles que la masse et la charge, elle possède une longueur

d'onde, peut être diffractée, etc. De surcroît, elle peut être la superposition de deux ondes.

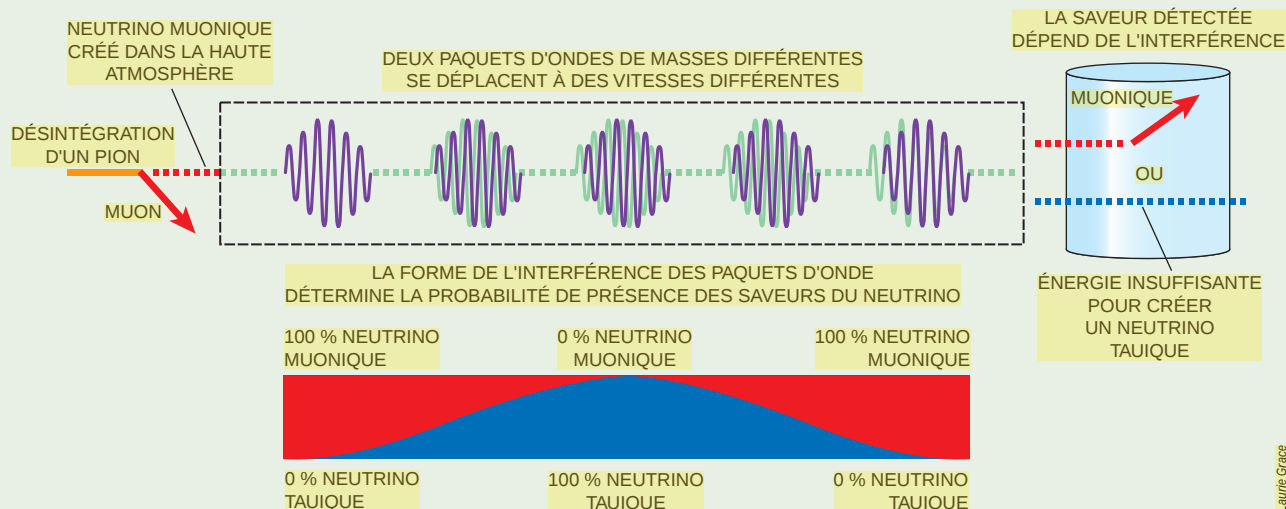
Supposons que ces deux ondes correspondent à des masses légèrement différentes. À mesure qu'elles se propagent, l'onde «plus légère» distance l'onde «plus massive», de sorte que toutes deux interfèrent avec un motif qui varie le long de la trajectoire (voir l'encadré ci-dessous). Cette interférence a un analogue musical : les battements sonores que l'on entend lorsque l'on joue deux notes presque identiques.

En musique, cet effet se perçoit à une oscillation du volume sonore ; en

Le mécanisme d'oscillation des neutrinos

Lorsqu'un pion se désintègre, il engendre toujours un neutrino. Comme toute particule quantique, un neutrino est décrit par une onde. Cette onde est une superposition de paquets d'ondes de différentes masses (*en violet et en vert, au centre*), qui se propagent à des vitesses différentes : le moins massif est plus rapide que le plus massif. Au cours de cette propagation, les ondes interfèrent : ces interférences expliquent que l'on observe un neutrino muonique (*en rouge*) ou un neutrino tauique (*en bleu*), selon les points de la trajectoire (*en bas*). Comme tout effet quantique, le phénomène est aléatoire, avec une probabilité supérieure de détection

d'un neutrino muonique près de son point de production. Les probabilités oscillent : elles sont en faveur de la détection d'un neutrino tauique à une certaine distance de la source, puis en faveur de la détection d'un neutrino muonique un peu plus loin. Finalement, lorsque le neutrino interagit dans le détecteur (*à droite*), les dés quantiques sont lancés. Si c'est un neutrino muonique qui interagit avec l'eau, un muon est produit. Si les probabilités sont en faveur du neutrino tauique, qui n'a pas suffisamment d'énergie pour créer une particule tau, 12 fois plus massive que le muon, le détecteur *Super-Kamiokande* ne détecte rien.



physique quantique, c'est la probabilité de détecter l'un ou l'autre des types de neutrino qui oscille. Au début, la probabilité que le neutrino soit muonique est égale à 100 pour cent. Après une certaine distance, la probabilité que le neutrino soit tauique est égale à 100 pour cent. Entre les deux positions, quand les probabilités sont inférieures, on verra, au hasard, un neutrino tauique ou un neutrino muonique.

Cette oscillation ne doit pas surprendre : les photons, ou grains de lumière, ont le même comportement. La lumière peut avoir divers états de polarisation, par exemple verticale, horizontale, circulaire droite ou circulaire gauche. Ces états ne correspondent pas à des masses différentes (tous les photons ont une masse nulle), mais, dans certains matériaux « optiquement actifs », la lumière de polarisation circulaire gauche se déplace plus vite que la lumière de polarisation circulaire droite. Or, un photon de polarisation verticale est une superposition de ces deux polarisations circulaires. Lorsqu'il traverse un matériau optiquement actif, sa polarisation tourne (autrement dit, oscille) de la verticale à l'horizontale à mesure que les phases de ses deux composantes circulaires alternent.

Dans *Super-Kamiokande*, l'observation des oscillations de neutrinos ne nécessite aucun matériau spécifique : si les deux composantes du neutrino ont des masses suffisamment différentes, elles engendrent des oscillations de saveur, que le neutrino se déplace dans l'air, dans une roche ou dans le vide. Lorsqu'un neutrino descend dans la cuve de l'expérience, le nombre d'oscillations qu'il a effectuées dépend de son énergie et de la distance qu'il a parcourue depuis sa création. Comme les neutrinos muoniques descendants ont parcouru quelques dizaines de kilomètres au plus, seule une fraction de

cycle s'est déroulée : on détecte presque toujours la saveur muonique originelle (voir la figure 3). En revanche, les neutrinos muoniques ascendants, créés à des milliers de kilomètres du détecteur, ont oscillé tant de fois qu'en moyenne seule la moitié d'entre eux est détectée sous la forme de neutrinos muoniques. L'autre moitié traverse le détecteur sous la forme de neutrinos tauiques, indétectables.

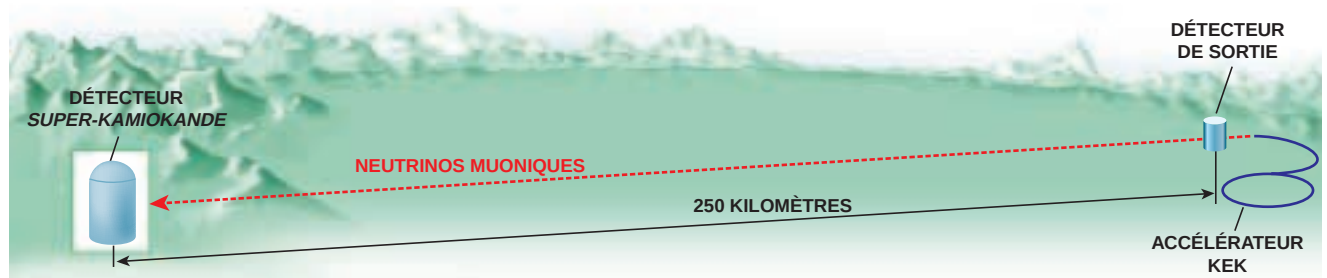
Un témoignage convaincant

Ces arguments sur le quotient des saveurs et les quantités d'événements ascendants par rapport aux événements descendants sont si convaincants que la majorité des physiciens ont admis cette oscillation des neutrinos. Pour compléter notre étude, nous avons précisé la dépendance du nombre de neutrinos muoniques en fonction de leur énergie et de leur angle d'incidence, puis nous avons comparé les nombres mesurés avec les prévisions obtenues à partir de plusieurs scénarios d'oscillations (y compris aucune oscillation). Les données décrivent très bien des oscillations pour certaines valeurs des différences de masses et pour certains autres paramètres physiques (voir la figure 5).

Ayant observé quelque 5 000 événements durant les deux premières années de notre expérience, nous savons que les anomalies observées ne s'expliquent pas par des fluctuations statistiques. Cependant, nous voulons maintenant confirmer notre découverte en observant l'oscillation des neutrinos muoniques à l'aide d'autres techniques ou dans le cadre d'autres expériences. Plusieurs détecteurs, au Minnesota et en Italie, ont déjà fourni une telle confirmation, mais avec trop peu d'événements pour donner une statistique satisfaisante.

Les oscillations de neutrinos ont été corroborées par des études d'un autre type d'interactions des neutrinos atmosphériques : leurs collisions avec les noyaux atomiques de la roche qui entoure notre détecteur. Lorsqu'ils interagissent dans la montagne, les neutrinos électroniques créent des électrons et des gerbes de particules, mais celles-ci sont absorbées dans la roche et n'atteignent jamais la grotte où est installé le détecteur. En revanche, les neutrinos muoniques de grande énergie créent des muons énergiques, qui peuvent traverser plusieurs centaines de mètres de roche et pénétrer dans la cuve du détecteur. Les muons captés proviennent alors des neutrinos ascendants, car les muons descendants sont masqués par le bruit de fond des muons engendrés par les rayons cosmiques qui pénètrent dans le mont Ikenoyama par en haut.

Les muons ascendants que nous parvenons à compter arrivent selon des directions comprises entre la verticale et presque l'horizontale. Ces directions correspondent à des distances de propagation des neutrinos



4. LE JAPON, LES ÉTATS-UNIS ET L'EUROPE projettent des expériences où des faisceaux de neutrinos émis par des accélérateurs seront détectés après avoir parcouru plusieurs centaines de kilo-

mètres. Ces expériences devraient confirmer l'existence de l'oscillation des neutrinos. Elles permettront la mesure précise des constantes naturelles qui la gouvernent.