

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.

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.

