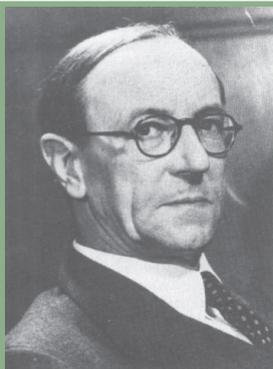


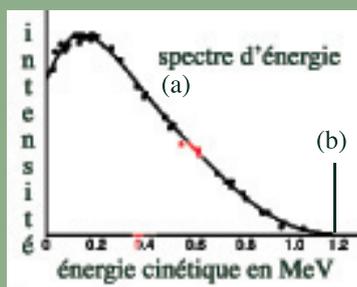


Histoire

Naissance d'une nouvelle particule



James Chadwick (1891-1974).
Physicien anglais, prix Nobel de physique en 1935, il a découvert l'existence du neutron en 1932.



Allure d'un **spectre (a)** de rayonnement bêta obtenu par Chadwick alors qu'il attendait une raie comme celle représentée en (b).



Wolfgang Pauli (1900-1958)
Physicien autrichien, prix Nobel en 1945.

En 1914, **James Chadwick** mesure la distribution en énergie – qu'on appelle aussi « **spectre** » – des électrons émis lors de la désintégration bêta de noyaux radioactifs. Il obtient un résultat contraire à toutes les attentes du moment : si, comme on le pensait à l'époque, seul un électron était produit lors de la désintégration bêta, la loi de conservation de l'énergie devrait imposer que l'énergie de ce dernier fut fixée à une valeur bien précise (E), égale à la différence entre les masses des noyaux initial et final. On s'attend alors à obtenir un spectre « discret », c'est-à-dire une simple raie à cette valeur de l'énergie. Surprise ! Chadwick obtient un spectre « continu », où l'énergie des électrons peut prendre toutes les valeurs possibles dans un intervalle allant de zéro à E . Les électrons ont systématiquement moins d'énergie qu'ils ne devraient. Où part l'énergie manquante ?

Après l'abandon de quelques hypothèses non confirmées par l'expérience, une possibilité diablement intéressante – défendue par Niels Bohr lui-même – subsiste pour expliquer ce phénomène. Le « sacro-saint » principe de conservation de l'énergie ne s'appliquerait pas rigoureusement pour chaque émission bêta, mais seulement en moyenne sur plusieurs désintégrations. Cette idée fait son chemin alors que vient de naître la toute nouvelle théorie de la mécanique quantique, qui révolutionne nombre d'idées et de concepts jusqu'alors acceptés.

Au début des années 30, le physicien autrichien **Wolfgang Pauli** tente de sauvegarder le principe de conservation de l'énergie. Il propose comme « remède du désespoir » qu'un autre rayonnement, très pénétrant (donc difficilement décelable), formé de nouvelles particules soit émis en même temps que l'électron lors d'une désintégration bêta. Ces particules hypothétiques emportant une partie de l'énergie disponible, ceci expliquerait le spectre continu des électrons. D'après les données expérimentales existantes, Pauli conclut que ces particules doivent être neutres (sans quoi elles auraient été facilement observées), de spin $1/2$ et de faible masse par rapport au proton. Il les nomme « neutrons » et suppose que, puisqu'elles sont produites lors de la désintégration de noyaux, elles font partie de leurs constituants. Le neutron est-il né ?

Mais Pauli ne croit guère à son hypothèse. En décembre 1930, il fait transmettre à un congrès de physique se tenant à Tübingen une **lettre** dont les termes montrent assez dans quelles dispositions il proposait cette idée qu'il nommait lui-même « expédient ». Il était si peu convaincu qu'il n'assista pas au congrès en question pour pouvoir honorer de sa présence un bal se tenant à Zurich. Voici des passages de cette lettre sur la page ci-contre.

Et le « neutron » devint « neutrino »...

Pauli expose à nouveau sa proposition dans une conférence à Pasadena (Californie) en 1931 mais abandonne l'idée que ces particules neutres soient des composants du noyau et, en conséquence, le nom de neutron. Il renonce toutefois à faire paraître le compte rendu de son intervention à cette conférence. Il faut noter que pendant ce temps-là Niels Bohr continuait à défendre l'idée d'une conservation de l'énergie



Lettre traduite de l'allemand par Claude Maillard (Wolfgang Pauli, Physique moderne et philosophie, Albin Michel, Paris, 1999).

La lettre de Pauli

Zurich, 4 décembre 1930,

Chères Mesdames, chers Messieurs les Radioactifs,

Comme va vous l'expliquer avec plus de détails celui qui vous apporte ces lignes et auquel je vous prie d'accorder toute votre bienveillante attention, il m'est venu en désespoir de cause, face à la statistique « fausse » concernant les noyaux N et Li6 [azote et lithium-6] ainsi que le spectre bêta continu, l'idée d'un expédient pour sauver le « principe d'échange » de la statistique et le principe de conservation de l'énergie. Il s'agit de la possibilité qu'il existe dans les noyaux des particules électriquement neutres, que je propose d'appeler neutrons, dotés d'un spin de valeur 1/2, obéissant au principe d'exclusion et qui de surcroît se distinguent des quanta de lumière par le fait qu'ils ne se déplacent pas à la vitesse de la lumière. La masse des neutrons doit être du même ordre de grandeur que celle des électrons, et en tout cas non supérieure à 0,01 de celle des protons. - Le spectre bêta continu se comprendrait alors en admettant par hypothèse que lors de toute désintégration bêta est émis, outre l'électron, aussi un neutron, de telle sorte que la somme des énergies du neutron et de l'électron soit constante. [...]

A l'heure actuelle, cependant, je ne m'aventurerai pas à publier quelque chose sur cette idée, et je me tourne d'abord en toute confiance vers vous, chers Radioactifs, pour vous demander ce qu'il en serait d'une expérimentation établissant l'existence d'un tel neutron [...]

Je concède que mon expédient pourrait bien apparaître a priori comme peu crédible, parce que si les neutrons existaient, on les aurait sans doute vus depuis bien longtemps. Mais il faut oser pour réussir, et la gravité de la situation en ce qui concerne le spectre bêta continu est bien mise en lumière par un propos de mon très éminent prédécesseur, M. Debye, qui me disait récemment à Bruxelles : « Oh, c'est comme pour les nouveaux impôts : il vaut mieux ne pas y penser du tout ! » Mais c'est bien pourquoi il importe de discuter sérieusement de tout chemin qui pourrait nous mener hors de l'impasse. - Ainsi donc, chers Radioactifs, examinez et jugez.- Malheureusement, je ne peux pas venir moi-même à Tübingen, ma présence à Zurich étant absolument requise en raison d'un bal qui a lieu dans la nuit du 6 au 7 décembre.- [...]

Votre très dévoué,

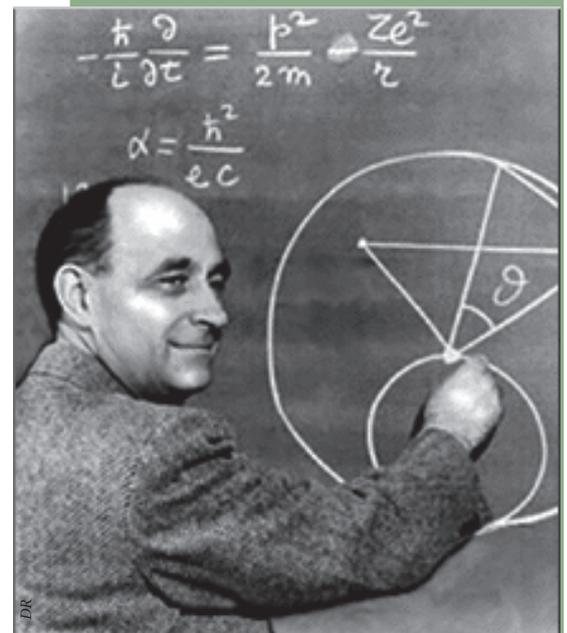
W. Pauli

non rigoureuse mais statistique.

En 1932, Chadwick met en évidence le « véritable » neutron (voir Élémentaire N°2), qui est bien une particule neutre et de spin 1/2, mais dont la masse est voisine de celle du proton. Lors de séminaires tenus à Rome, **Enrico Fermi** attribue le nom de « neutrino » (petit neutre, s'opposant au « gros neutre », *neutrone*) à la particule proposée par Pauli. Une mise au point générale s'opère au congrès Solvay de Bruxelles en 1933. Les réticences de Pauli s'effacent et il signe l'acte de naissance du neutrino dans une communication officielle à ce même congrès. Fin 1933 Fermi écrit un article développant la théorie complète de la désintégration bêta et du neutrino. Il y introduit l'interaction faible. L'article est refusé par la revue *Nature* parce qu'il contient « des spéculations trop éloignées de la réalité physique » ; il sera d'abord publié en italien, puis finalement en allemand dans la revue *Zeitschrift für Physik* (1934). En 1936, Bohr accepte sans réserve la validité stricte de la conservation de l'énergie et l'existence du neutrino.

Un neutrino... deux neutrinos... trois neutrinos...

Si l'hypothèse de Pauli ainsi que la théorie de Fermi des interactions faibles sont largement acceptées, le neutrino, qui n'est sensible qu'aux interactions faible et gravitationnelle, échappe à toute détection directe



Enrico Fermi (1901-1954)
Physicien italien, prix Nobel en 1938 pour ses travaux sur la radioactivité artificielle.



Naissance d'une nouvelle particule



Dessin de C. Cowan par I. Waloschek.



Frederick Reines (1918-1998)
Physicien américain, prix Nobel en 1955. Il a découvert, avec C. Cowan, le neutrino- ν_e en 1956.

pendant plus de deux décennies. Il faudra attendre 1956 pour que les premiers neutrinos (en fait des antineutrinos) soient effectivement détectés (voir « Découverte »). Avec la découverte, en 1936, du muon, un cousin lourd de l'électron (voir Élémentaire N°3), les physiciens sont amenés à supposer l'existence d'un second neutrino, associé au muon, tout comme le neutrino de Pauli est associé à l'électron dans l'interaction faible. Ce neutrino « muonique » sera effectivement découvert quelques années après son cousin « électronique ». Après la découverte du lepton tau, un second cousin de l'électron, 3500 fois plus lourd, l'existence d'un troisième type de neutrino (on parle de « saveur ») ne fera de doute pour personne. Cependant, ce neutrino « tauonique » ne sera mis en évidence de façon directe que tardivement, en 2000 (voir « Découverte »), en partie à cause de la masse élevée du lepton qui lui est associé.

Mais l'existence de ce neutrino du troisième type avait été démontrée de manière indirecte dix ans auparavant, en 1990. En effet, les études de précision concernant les interactions électro-faibles menées auprès des collisionneurs d'électrons et de positrons LEP au CERN et SLD aux États-Unis (en particulier, l'analyse précise des désintégrations des bosons Z^0) ont montré qu'il ne peut exister que **trois saveurs de neutrinos** de masses inférieures à la moitié de celle du Z^0 . Juste retour des choses : en effet, ce sont les neutrinos qui, n'étant sensibles ni aux interactions fortes, ni aux interactions électromagnétiques, avaient permis de mettre en évidence l'existence de ce fameux boson en 1973 au CERN.

Existe-t-il d'autres neutrinos, plus lourds ? C'est une possibilité. C'est même une attente de nombreuses extensions de la théorie actuelle, le Modèle Standard. Pour tenter de mettre en évidence ces particules hypothétiques, les physiciens se tournent vers le ciel et essaient de détecter d'éventuelles manifestations indirectes. Par exemple, les neutrinos jouent un rôle clé lors de la synthèse des éléments légers dans l'Univers primordial. En effet, l'abondance des neutrinos détermine l'abondance des protons et neutrons disponibles pour former les premiers noyaux composés. Les données astrophysiques concernant l'abondance des noyaux légers dans l'Univers permettent ainsi d'obtenir des limites sur le nombre de neutrinos légers ayant des interactions faibles avec la matière. Ce nombre ne peut pas dépasser 3 ou 4, selon les hypothèses entrant en jeu dans l'analyse. Par ailleurs, les observations cosmologiques, par exemple du fond de rayonnement fossile, donnent les meilleures limites actuelles sur les masses des neutrinos légers. La somme des masses de ces derniers est au plus de quelques électronVolt.

Où sont passés les neutrinos ?

En fait, les neutrinos jouent aussi un rôle clé dans la synthèse de tous les éléments, au cœur des étoiles. Ces gigantesques réacteurs nucléaires extraterrestres sont des sources importantes de neutrinos. D'où l'idée des physiciens d'utiliser ces derniers comme sonde de l'Univers : on parle « d'astronomie neutrino ». L'expérience Homestake, menée par Raymond Davies Junior, installée dans une mine du Dakota du Sud, a été la première à détecter des neutrinos provenant du Soleil, afin de tester les modèles du fonctionnement interne de notre étoile. En 1968, les premiers résultats



Naissance d'une nouvelle particule

indiquent un déficit important par rapport à toutes les prévisions existantes.

De nombreuses hypothèses sont avancées pour expliquer le phénomène, soit concernant les modèles du Soleil, soit concernant les neutrinos eux-mêmes. L'une d'elles s'appuie sur une proposition de Bruno Pontecorvo datant de 1957, selon laquelle, sous certaines conditions, les neutrinos peuvent « osciller », c'est-à-dire se transformer les uns en les autres en se propageant (voir « Théorie »). Certains neutrinos électroniques émis par le Soleil se transformeraient ainsi en neutrinos muoniques lors de leur voyage jusqu'à la Terre. Ceci permettrait d'expliquer le déficit observé par l'expérience Homestake, qui ne détecte que les neutrinos électroniques.

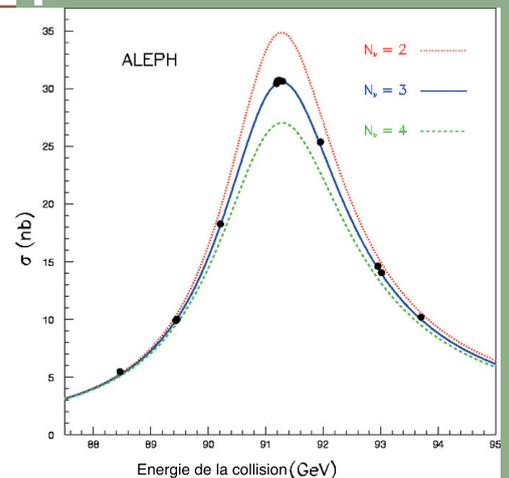
Homestake continuera d'enregistrer des données jusqu'en 1993 – soit pendant 24 ans ! Les oscillations des neutrinos électroniques seront finalement observées par l'expérience KamLAND en utilisant des centrales nucléaires comme sources de neutrinos. Les oscillations de neutrinos muoniques seront mises en évidence de façon directe en 1998 par l'expérience KamioKaNDE au Japon. Les résultats obtenus montrent qu'au moins deux des trois neutrinos connus ont une masse non nulle.

La véritable nature des neutrinos

La découverte de masses non nulles pour les neutrinos pose de nombreuses questions. L'une d'elles concerne la nature de ces particules évasives : les neutrinos ayant un spin 1/2 doivent être décrits par la théorie de Dirac, tout comme les électrons. Mais dans ce cas, il doit exister des antineutrinos, tout comme le positron est associé à l'électron. Il est facile de distinguer un électron d'un positron, car ces particules sont de charges électriques opposées. Les choses ne sont pas aussi simples pour le neutrino, qui est électriquement neutre.

Dès 1937, un jeune physicien italien, Ettore Majorana, avait proposé une théorie décrivant des particules de spin 1/2 identiques à leurs antiparticules (de manière analogue à d'autres particules comme le photon, de spin 1, ou encore le pion neutre, de spin 0). Ces « particules de Majorana » sont automatiquement neutres. Pour des particules de masse nulle, il n'existe aucune différence entre une particule de Dirac neutre, ou une particule de Majorana. Mais ce n'est pas le cas pour des particules massives... comme les neutrinos.

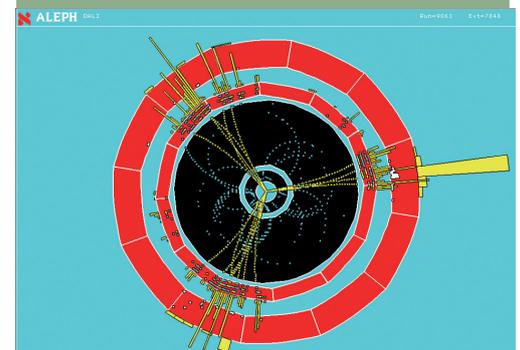
Diverses expériences tentent et tenteront de déterminer la nature des neutrinos dans les années à venir. La particule proposée par Pauli il y a près de 80 ans n'a pas fini de nous livrer tous ses secrets. L'histoire même de cette particule est marquée par le sceau du mystère. Par exemple, le jeune Majorana dont nous venons de parler... un caractère étrange, dont la disparition précoce reste aujourd'hui encore une énigme. Nous vous comptons cette histoire dans la suite de cet article.



Trois saveurs de neutrinos

Un des résultats les plus spectaculaires obtenus par les expériences qui ont utilisé le collisionneur LEP. Ces mesures consistent simplement à compter, en fonction de l'énergie de la machine donnée en abscisse, le nombre d'interactions conduisant à la production du boson Z^0 qui se désintègre en hadrons.

Les mesures (points noirs), faites ici par ALEPH, sont comparées aux valeurs attendues en supposant qu'il existe 2, 3 ou 4 saveurs de neutrinos. Elles favorisent clairement la valeur intermédiaire. La mesure combinée des quatre expériences opérant sur le LEP est de $2,984 \pm 0,008$.



Exemple d'un événement correspondant à la désintégration hadronique du boson Z^0 . Les traces des particules sont représentées en projection perpendiculaire à l'axe des faisceaux. Elles se regroupent, ici, en trois jets.



Histoire des neutrinos

IMB

Irvine-Michigan-Brookhaven est un détecteur situé à 600 m sous terre dans la mine de sel de Morton près de Cleveland (Ohio, USA).

LEP

Il s'agissait des quatre expériences ALEPH, DELPHI, L3 et OPAL situées à des points de collisions de l'accélérateur circulaire LEP d'électrons et de positrons du CERN.

SLD

C'était le détecteur installé autour d'un point de collisions des électrons et positrons produits par l'accélérateur linéaire SLC (SLAC Linear Collider) de SLAC (Californie, USA).

Événement courant neutre leptonique : un neutrino interagit avec un électron

Les deux traces linéaires quasi-verticales sont dues à des rayonnements cosmiques. Les halos lumineux sont les spots éclairant l'intérieur de la chambre à bulles Gargamelle. Sur ce négatif, les trajectoires des particules neutres (neutrinos ν en rose et photons γ en bleu), invisibles dans la chambre, ont été ajoutées. L'électron éjecté rayonne des photons γ dont on peut voir la conversion en paire électron-positron dans le liquide de la chambre.

1930 W. Pauli propose comme « remède du désespoir » l'existence d'une particule neutre de faible masse pour expliquer l'apparente non-conservation de l'énergie dans la désintégration bêta (voir encadré- *La lettre de Pauli.*)

1933 E. Fermi accepte l'hypothèse de l'existence du neutrino et construit la première théorie pour expliquer la désintégration bêta. Fermi propose le nom de neutrino (« le petit neutre » en italien) pour cette particule hypothétique.

1956 Mise en évidence expérimentale du neutrino-électron par F. Reines et R. Cowan (voir «*Découverte*»).

1957 B. Pontecorvo, vivant en Russie, formule pour la première fois la théorie de l'oscillation du neutrino. Il montre que s'il y a différents types de neutrinos, ils peuvent se transformer (osciller) les uns dans les autres.

1962 Découverte expérimentale du neutrino-mu par M. Schwartz, L. Lederman, J. Steinberger et J.-M. Gaillard (voir «*Découverte*»).

1968 Observation d'un déficit de neutrinos solaires dans l'expérience souterraine installée dans la mine Homestake dans le Dakota du Sud.

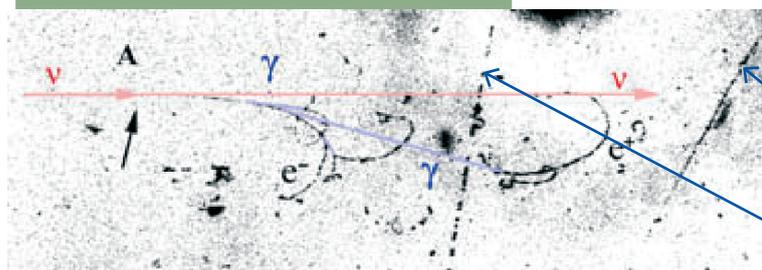
1973 Les neutrinos ne pouvant se manifester que par interaction faible, ils permettent d'avoir la première manifestation, au CERN, de l'existence du boson Z^0 (une des particules responsables de l'interaction faible).

1987 Détection de neutrinos émis par la Supernova SN1987A (située dans le nuage de Magellan) à KamiokaNDE et à l'IMB (Irvine-Michigan-Brookhaven).

1990 Les quatre expériences, situées à des points de collisions de l'accélérateur circulaire LEP d'électrons et de positrons du CERN, et SLD aux USA établissent qu'il n'y a que trois types de neutrinos de masses inférieures à la moitié de la masse du boson Z^0 .

1998 Mise en évidence du phénomène d'oscillations des neutrinos à KamioKaNDE. On sait dorénavant que les neutrinos ont une masse qui n'est pas nulle !

2000 Découverte du neutrino-tau par l'expérience DONUT (voir «*Découverte*»).



traces créées par des rayons cosmiques