

La découverte du second neutrino*

par Jack STEINBERGER
Prix Nobel de physique 1988

A la suite des immenses progrès expérimentaux dans notre compréhension du monde des particules élémentaires depuis les années 30, tout d'abord à partir des désintégrations des noyaux, puis à travers l'étude des rayons cosmiques et enfin depuis 1950 en utilisant toujours d'avantage les accélérateurs de particules, notre compréhension s'est cristallisée sur le «Modèle Standard» au début des années 70 grâce aux progrès théoriques. Dans cette théorie de jauge renormalisable des interactions faibles et fortes, les particules élémentaires se regroupent en «familles», chacune étant composée de quatre «fermions» (des particules de spin 1/2). Ces fermions interagissent entre eux par l'échange de trois sortes de particules «vecteur» (particules de spin entier), qui caractérisent les trois types fondamentaux d'interaction. Nous ignorons ici le quatrième type d'interaction, la gravitation, car, dans les expériences de physique des particules sur notre planète, elle est trop faible pour y jouer un rôle significatif (mais dans les tous premiers instants du big bang c'est l'inverse qui était vrai).

Chaque famille est constituée d'un «lepton» chargé, d'un lepton neutre (le neutrino), et de deux «quarks», respectivement de charge $2/3$ et $-1/3$. La distinction fondamentale entre ces particules réside dans leurs interactions. Toutes participent à l'**interaction faible**, qui est l'échange de particules massives de spin 1, neutre et chargées, découvertes seulement très récemment en 1983. La masse relativement grande de ces particules échangées est ce qui rend l'interaction faible à des énergies petites par rapport à leur masse. Les particules qui portent une charge électrique, c'est-à-dire tous les fermions sauf les neutrinos, ont de même des interactions **électromagnétiques**, proportionnelles à leurs charges, à travers l'échange de photons de masse nulle. Les quarks sont soumis de plus à l'**interaction forte**, par l'échange de huit «gluons» différents, eux aussi de masse nulle et responsables du confinement des quarks à l'intérieur des «hadrons» ; c'est ce qui forme la matière stable que nous connaissons : les neutrons et les protons. Le caractère exceptionnel des neutrinos réside dans le fait qu'ils sont soumis **seulement** à l'interaction faible. Ceci leur attribue un rôle très particulier dans le transport de l'énergie en astrophysique. On ne comprend

* **NDLR** : Traduit du texte original anglais de Jack STEINBERGER «The discovery of the second Neutrino» par Brigitte BLOCH-DEVAUX - CEA/DAPNIA/SPP.

pas actuellement pourquoi les particules possèdent une masse, pourquoi cette masse varie beaucoup d'une particule à l'autre dans une même famille et d'une famille à l'autre. La masse des neutrinos est très petite, peut-être même nulle. Depuis 1989, grâce aux expériences réalisées au CERN (Organisation Européenne pour la Physique des Particules), nous savons qu'il n'existe que trois familles, et pas plus. Tous les membres de ces familles ont été observés, à l'exception du troisième neutrino. La difficulté à détecter les neutrinos est une conséquence directe de l'interaction faible.

En 1961, à l'époque où se préparait l'expérience où le second neutrino a été observé, notre compréhension des particules était beaucoup plus primitive qu'elle ne l'est actuellement. Parmi les particules dites élémentaires, seuls le photon, l'électron, le neutrino-électron et le second lepton chargé, appelé muon, étaient connus. De plus, le proton, le neutron et une foule de «hadrons» instables connus faisaient l'objet de nombreuses expériences. A cette époque on pensait qu'ils étaient «élémentaires», nous savons maintenant qu'ils sont constitués de quarks et de gluons. Ni les quarks, ni même l'idée de famille n'étaient évoquées. Pourtant les progrès rapides des accélérateurs atteignant des énergies de particules plus élevées ont permis de réaliser des progrès expérimentaux importants. Du côté de la théorie, si l'interaction électromagnétique était bien comprise, la théorie de l'interaction forte était quasi-inexistante et celle de l'interaction faible existait sous une forme qui donnait une explication quantitative des phénomènes étudiés à ce jour mais manquait de cohérence interne et devait donc échouer à plus haute énergie.

Le muon est une particule instable et sa désintégration en électron et deux neutrinos était connue. Cependant, dans le cadre théorique de l'époque on attendait une faible partie des désintégrations en électron et photon, désintégration pourtant non observée. Ceci pouvait s'expliquer, si l'on supposait que les deux neutrinos de la désintégration du muon étaient de natures différentes, l'un associé au muon, l'autre à l'électron produit dans la désintégration. Mais la théorie n'était pas aussi convaincante qu'on l'aurait souhaité et le problème restait en attente «mijotant au coin du feu». Pourtant, en 1959, Bruno Pontecorvo, un physicien expérimentateur italien à l'imagination extraordinaire, qui avait déjà à son actif plusieurs idées innovantes extrêmement importantes, pensait qu'il fallait s'attaquer au problème expérimentalement [1], et suggéra une méthode malheureusement irréalisable à cette époque, en particulier derrière le rideau de fer où il s'était établi en 1951 pour des raisons idéologiques.

Indépendamment, en 1960, à l'université de Columbia à New York, un jour à l'heure du thé, T.D. Lee posa la question très fertile de ce qu'il faudrait mettre en œuvre pour étudier l'interaction faible aux hautes énergies maintenant disponibles auprès des nouveaux accélérateurs. Tout ce que l'on connaissait de l'interaction faible à l'époque reposait sur ce que l'on pouvait apprendre de l'étude de la désintégration bêta, de celle

du muon et de beaucoup de hadrons. Malheureusement, bien que professeur aussi à Columbia, je n'étais pas présent à cette occasion et ne l'ai su que par ouï-dire. Melvin Schwarz, lui, était là et, réfléchissant à la question de T.D., arriva à l'idée que l'on pouvait apprendre énormément en étudiant les interactions de neutrinos de haute énergie [2] qui pourraient être produits dans des faisceaux d'intensité suffisante auprès de l'accélérateur en construction à ce moment-là dans le laboratoire voisin de Brookhaven (BNL).

Cette idée était extrêmement riche ; non seulement elle a permis de clarifier la question de l'identité des neutrinos dans la désintégration du muon et donc de découvrir le second neutrino, mais elle a été les prémices d'une utilisation extensive des faisceaux de neutrinos. Ces derniers ont permis la découverte d'une forme jusqu'ici inconnue de l'interaction faible, ce qu'on a appelé le «courant neutre». Son existence était prédite par la nouvelle théorie électrofaible alors bourgeonnante à la fin des années 60 et au début des années 70 et sa découverte au CERN dans les interactions de neutrinos en 1973 a officialisé cette nouvelle théorie dans l'instant, une superbe percée en physique des particules. Quelques années plus tard, toujours à l'aide des interactions de neutrinos, à des énergies toujours plus hautes, la structure en quarks du nucléon a pu être étudiée avec précision, renforçant notre compréhension du rôle joué par les quarks. Les «violations d'échelle» prédites par la théorie naissante des interactions fortes, la chromo-dynamique quantique (QCD), ont pu être mesurées quantitativement ; de cette façon aussi, une nouvelle théorie a pu voir le jour.

L'idée n'était pas seulement originale mais arrivait aussi au bon moment. Elle n'aurait pas pu émerger plus tôt de façon utile, puisque la probabilité d'interaction des neutrinos est proportionnelle à leur énergie, de même que la possibilité de les focaliser en faisceaux. L'accélérateur alors en construction à BNL, tout comme son semblable au CERN, étaient les premiers à offrir une possibilité pratique de mettre en œuvre de telles expériences. De plus, l'intensité du faisceau produit à BNL était notablement supérieure à celle prévue initialement. Si cet événement fortuit ne s'était pas produit, peut-être l'expérience n'aurait-elle pas abouti... L'idée était juste à maturité pour son temps.

L'expérience a été montée en 1961 et les résultats publiés en 1962 [3]. La conception d'un faisceau simple de neutrinos ne posait pas de problème particulier, bien que de grandes améliorations aient été réalisées depuis dans ce domaine. Les protons de 15 GeV (milliers de millions d'électron-volts) circulant dans l'accélérateur vont frapper une cible. Dans le choc, des hadrons instables, principalement des mésons π , mais aussi des mésons K sont produits. Ceux qui sont émis à petit angle (environ 7,5 degrés) peuvent parcourir librement une quinzaine de mètres. Sur cette distance, environ 6 % des mésons π et 30 % des mésons K vont se désintégrer en émettant un

neutrino et un muon. La région de désintégration (comme on peut le voir sur la figure 1) se termine sur un blindage de fer, qui doit être assez épais pour absorber les particules autres que les neutrinos. Ces derniers en ressortent indemnes.

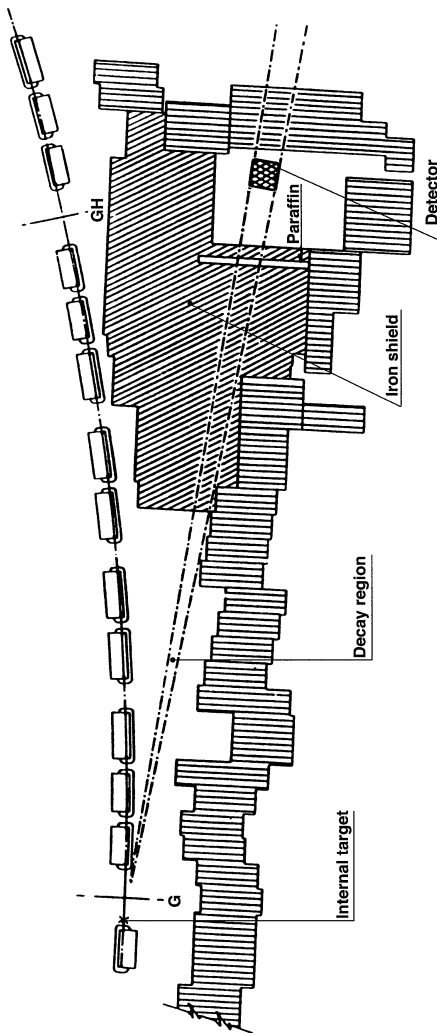


Figure 1 : L'expérience auprès de l'accélérateur AGS (Synchrotron à gradient alterné) au Laboratoire BNL. On peut voir successivement : une portion de l'anneau de l'accélérateur, la position de la cible interne, la zone de désintégration des hadrons en neutrinos, le blindage de fer et l'emplacement du détecteur.

Le défi d'une telle expérience réside dans la conception du détecteur. Il doit remplir à la fois le rôle de cible où les neutrinos interagissent et celui de détecteur pour les particules émises. Il se doit d'être très massif pour qu'il s'y produise un nombre suffisant d'interactions malgré la faible probabilité qu'un neutrino individuel interagisse. Nous avons eu la chance qu'une nouvelle méthode de détection ait juste été proposée dans laquelle les traces des particules sont visualisées par les décharges qu'elles produisent dans le gaz entre deux surfaces métalliques portées à une différence de potentiel suffisante. Le détecteur était composé de dix modules, chacun formé de neuf plaques d'aluminium de 2,5 cm d'épaisseur et de 1,2 m de côté, formant ainsi huit intervalles pour les décharges et pesant une tonne chacun. Ils étaient disposés en deux lignes, de cinq modules chacune, le long de la ligne de faisceau, l'une au-dessus de l'autre.

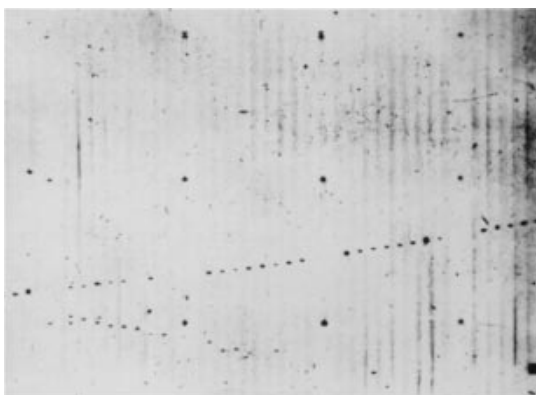


Figure 2 : L'une des quelques douzaines d'interactions de neutrinos observées. Le neutrino lui-même ne laisse bien sûr aucune trace. La trace droite la plus énergétique et pénétrante est identifiée comme le muon en lequel le neutrino s'est transformé. La trace légèrement diffusée est probablement un hadron moins énergétique qui est aussi émis dans l'interaction du neutrino avec un nucléon d'un noyau d'aluminium.

Après une exposition de plusieurs mois correspondant à un flux de 3.10^{17} protons sur la cible, une cinquantaine d'événements ont été sélectionnés. On a pu démontrer que ces événements étaient vraiment produits par des neutrinos et non pas par des rayons cosmiques ou d'autres particules produites par l'accélérateur, comme les neutrons. La figure 2 est l'image d'un événement typique. Ces interactions présentaient en général un muon énergétique, identifié par sa pénétration dans une épaisseur d'aluminium telle que d'autres particules y auraient interagi. En particulier, les électrons ont un comportement de type «gerbe» dans la matière : ils émettent des photons qui se convertissent en paires électron-positon qui émettent à leur tour des photons et ainsi de suite. Il était donc prouvé que ces neutrinos se transformaient en

muons dans l'interaction, mais pas en électrons. On se rappellera que ces neutrinos étaient produits conjointement avec des muons dans la désintégration de hadrons. Si ces neutrinos avaient été identiques à ceux produits dans la désintégration bêta des noyaux accompagnés d'électrons, alors par désintégration bêta inverse, ils auraient produit des électrons, en contradiction avec le résultat expérimental. Ceci démontrait la différence d'identité du «neutrino-muon» observé dans cette expérience et du neutrino-électron déjà connu.

L'expérience, surnommée par certains «expérience des deux neutrinos» fut l'une des nombreuses briques de la construction du Modèle Standard, un superbe morceau de notre culture qui, avec la relativité, la mécanique quantique et les percées remarquables en biologie moléculaire fondamentale, restera à l'honneur du siècle qui touche à sa fin. Il n'est pas injustifié de garder cela à l'esprit, à un moment où il est plus habituel d'évaluer la qualité de la recherche scientifique par son potentiel de retombées économiques immédiates plutôt que par son apport culturel.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] B. PONTECORVO : *J. Exptl . Theoret. Phys. (USSR)* **37** (1959), 1751.
- [2] M. SCHWARTZ : *Phys. Rev. Letters* **4** (1960), 306.
- [3] G. DANBY, J.-M. GAILLARD, K. GOULIANOS, L. M. LEDERMAN, N. MISTRY, M. SCHWARTZ, J. STEINBERGER : *Phys. Rev. Letters* **9** (1962), 36.