

Mardi 16 février 2021

Communication de **Joseph REMILLIEUX**, membre titulaire émérite

## LE NEUTRINO, UNE PARTICULE OMNIPRÉSENTE ET FANTÔMATIQUE QUI DÉFIE ENCORE LES PHYSICIENS

Pourquoi se pencher en 2021 sur une particule fondamentale qui fut prédite, en désespoir de cause, par le théoricien Wolfgang Pauli en 1930 et détectée, 26 ans plus tard, par Frederick Reines et Clyde Cowan ? Parce qu'aujourd'hui encore, la compréhension de l'origine et du comportement des innombrables neutrinos sillonnant l'Univers, continue à défier théoriciens et expérimentateurs.

La première des surprenantes caractéristiques des neutrinos est leur capacité à traverser d'énormes épaisseurs de matière, presque sans aucune interaction. En conséquence, les expérimentateurs ont dû développer de véritables prouesses pour réussir à détecter le passage, à des vitesses proches de celle de la lumière, de quelques-uns de ces fantômes dont les masses sont encore très mal connues, mais certainement très faibles par rapport à celles de toutes les autres particules de matière connues (les *fermions*).

Leur seconde caractéristique est l'extrême diversité de leurs origines : depuis la radioactivité environnante, en passant par les réacteurs à fission nucléaire, l'atmosphère, le Soleil, le Cosmos et même le Big-bang. Cette diversité est associée à des différences d'énergies gigantesques entre ces différentes sortes de neutrinos, de  $10^{-6}$  eV à  $10^{18}$  eV.

La troisième est leur étrange comportement quantique qui leur permet d'*osciller* entre trois différentes *saveurs*, durant leur propagation dans le vide ou dans la matière. Avant que ce comportement transformiste des neutrinos ne soit découvert, les physiciens furent, de longues années, confrontés à de répétitifs et mystérieux « déficits » dans le comptage des neutrinos par rapport aux prévisions théoriques. Ces déficits étaient en fait dus à leurs dispositifs de détection qui, à l'époque, n'étaient sensibles qu'à une seule des trois saveurs possibles.

La quatrième enfin, concerne un comportement asymétrique dû à leur *hélicité*, (*gauche* pour les neutrinos et *droite* pour les antineutrinos) associé au viol de certaines symétries fondamentales de la physique. Une des conséquences de cette asymétrie a été récemment rapportée : on aurait observé, au Japon, une différence entre les vitesses d'oscillations de faisceaux de neutrinos et d'antineutrinos. Cette différence, si elle est confirmée, permettrait enfin de comprendre pourquoi il n'y a plus aucune trace d'antimatière dans l'Univers, alors que le Big Bang avait créé autant de matière que d'antimatière.

Cet exposé décrit les principales étapes théoriques et expérimentales qui ont été franchies en un siècle dans la compréhension de la physique des neutrinos, depuis les premières fois où leur existence fut suspectée, dans le sillage de la découverte de la radioactivité, jusqu'au développement aujourd'hui d'une très prometteuse « astronomie neutrino ».

## Le concept de neutrino : une naissance radioactive et non-désirée

C'est en 1896, que fut découverte la radioactivité : **Henri Becquerel** baptisa *rayonnement uranique* la radiation étonnement pénétrante qui était émise spontanément par un minerai d'uranium. En 1899, **Ernest Rutherford** découvrit d'autres rayonnements qu'il classa en fonction de leur pouvoir pénétrant dans les solides : il appela *rayons alpha* ceux qui étaient arrêtés par une simple feuille de papier et *rayons bêta* ceux qui nécessitaient une feuille d'aluminium pour les arrêter. Enfin, en 1900, **Paul Villard** observa des rayonnements encore plus pénétrants, capables de traverser des feuilles de plomb, il les nomma logiquement *rayons gamma*. Ce sont en fait les rayons bêta qui furent à l'origine de la découverte des neutrinos.

En effet, en 1902, **Pierre et Marie Curie** montrèrent que le rayonnement bêta était composé de particules de charges négatives. La même année, **Walter Kaufmann** et **Ernest Rutherford** montrèrent que les particules émises étaient en fait des *électrons*. Les expérimentateurs se concentrèrent alors sur le spectre en énergie de ces électrons. La première publication fut celle de **Lise Meitner**, la future découvreuse du mécanisme de la fission nucléaire, qui annonça, en 1911, que ces électrons étaient mono énergétiques. Cela parut alors en parfaite continuité avec ce que l'on savait, depuis 1903, de la radioactivité *alpha* : les noyaux d'Hélium émis étaient mono énergétiques. Mais dans le cas du rayonnement bêta cette première annonce était malheureusement erronée. **James Chadwick** exprima en 1914, en ces termes modestes son désaccord avec l'observation de Lise Meitner : « *je trouve que le spectre des électrons est continu, il doit y avoir une stupide erreur quelque part* ». Malgré le ralentissement des recherches pendant la première guerre mondiale, plusieurs laboratoires confirmèrent la mesure de Chadwick. Mais cette continuité du spectre des électrons émis, pour dissiper l'énergie du rayonnement, posa alors un très difficile problème d'interprétation, à tel point que **Niels Bohr** lui-même était prêt à admettre que la radioactivité bêta pourrait *violier le principe de la conservation de l'énergie* ! On en resta là, jusqu'à ce que **Charles Ellis** et **William Wooster** publient en 1927 la forme détaillée du spectre des électrons émis lors de la désintégration bêta du noyau Bismuth 210 vers le Polonium 210.

C'est à partir de l'étude de la forme de ce spectre continu d'électrons, que trois ans plus tard **Wolfgang Pauli**, fermement attaché au principe de la conservation de l'énergie, proposa, dans une lettre pleine d'humour, « *une hypothèse désespérée* » à ses collègues physiciens qui étaient réunis en décembre 1930 à Tübingen. Pour résoudre l'énigme du spectre continu Pauli proposait l'existence d'une particule neutre, de faible masse et invisible qui serait émise en couple avec chacun des électrons et emporterait la fraction manquante de l'énergie totale disponible. Il proposait d'appeler « *neutrons* » ces particules. Ce fut une appellation très éphémère, car en 1932 James Chadwick découvrit le « *vrai neutron* », partenaire des protons dans les noyaux d'atomes. L'accueil de sa proposition fut si froid que Pauli attendit trois ans avant de la publier, dans les actes du Congrès Solvay de 1933.

En 1933, **Francis Perrin**, étudia la forme de la *queue à haute énergie* du spectre des électrons et en déduisit que la masse des « neutrons » de Pauli était certainement très inférieure à celle des électrons. En effet, Perrin remarqua que lorsque l'énergie des électrons est maximum (celle de leurs partenaires « neutrons » étant nulle) il n'y avait pas d'écart  $\Delta E$  mesurable, entre l'énergie maximum des électrons et l'énergie nucléaire totale disponible. Si cet écart avait été mesurable, il aurait permis de déterminer la masse,  $m = \Delta E/c^2$ , du partenaire invisible. Nous verrons plus loin que cette méthode, très peu précise car elle exploite la partie

du spectre où le nombre d'évènements tend vers zéro, est aujourd'hui exploitée à Karlsruhe (expérience *KATRIN*) pour déterminer la masse absolue des neutrinos.

En cette même année 1933, l'italien **Enrico Fermi** apporta une contribution décisive en proposant une formulation quantique de l'émission des électrons par radioactivité bêta, après avoir renommé *neutrino* (le petit neutre ... comme on dit le *bambino*) le « neutron » de Pauli qui avait été détrôné par Chadwick. Fermi traita la désintégration bêta d'un noyau comme une interaction mettant en jeu quatre « fermions » (comme on le dit aujourd'hui) : un neutron du noyau radioactif initial (souffrant d'un excès de neutrons) qui, pour rétablir l'équilibre proton/neutron, se transforme en un proton dans le noyau résiduel, avec dissipation de l'énergie de masse disponible par émission hors du noyau d'une paire électron-neutrino. A partir des *fonctions d'ondes* de ces quatre particules, Fermi montra que la statistique quantique reproduit parfaitement la forme continue du spectre des électrons émis. **Hans Bethe** et **Ronald Pierce** utilisèrent ensuite ce formalisme pour prévoir que la probabilité d'interaction des neutrinos avec la matière devait être infime, avec des pouvoirs de pénétration dans les solides de l'ordre de  $10^{16}$  Km. Cependant, comme Pauli l'avait subi trois ans plutôt, ce fut au tour de Fermi de recevoir un accueil très froid à l'annonce de son modèle quantique : c'est après qu'Arthur Eddington ait publié son scepticisme sur la validité de cette théorie que la revue *Nature* rejeta la publication soumise par Enrico Fermi.

C'est dans ce contexte que **Irène** et **Frédéric Joliot Curie** découvrirent, en 1934, la radioactivité bêta-plus, émise par des noyaux souffrant d'un excès de protons. Cela confortait la théorie de Fermi et introduisait une différenciation entre les couples (électron-antineutrino) et (positon-neutrino) émis dans les deux types de radioactivités :

$n \rightarrow p + (e^- + \text{antineutrino})$ , dans le cas de la radioactivité  $\beta^-$

$p \rightarrow n + (e^+ + \text{neutrino})$ , dans le cas de la radioactivité  $\beta^+$ .

### Vingt-cinq ans plus tard, les fantômes de Pauli et de Fermi sont enfin observés

Ce n'est qu'en 1956 que la preuve de l'existence des (anti) neutrinos fut apportée par **Frederick Reines** et **Clyde Cowan**. Ils utilisèrent la réaction inverse de la radioactivité bêta-moins ( antineutrino + p  $\rightarrow$  n + e<sup>+</sup> ) qui produit des *positons*  $e^+$ , particules particulièrement faciles à détecter. Les protons cibles étaient ceux d'un bidon de 400 litres d'eau, placé dans le flux intense d'antineutrinos émis par les produits de fission du réacteur nucléaire de *Savannah River*. Ce bidon placé sous le cœur du réacteur était ceinturé de 110 photomultiplicateurs, destinés à détecter l'annihilation des positons émis :  $e^+ + e^- \rightarrow 2 \text{ photons}$  de 511 KeV, émis en coïncidence et à  $180^\circ$  l'un de l'autre.

Avec ce simple dispositif, ils détectèrent trois antineutrinos par heure, une signature largement suffisante pour leur permettre d'envoyer le 4 juin 1956 un télégramme de chaleureuse reconnaissance à Pauli, 25 ans après l'envoi de sa fameuse lettre proposant sa *solution désespérée*. Reines reçut le Prix Nobel en 1995, mais malheureusement à cette date Cowan était déjà décédé depuis 21 ans.

### Y auraient-ils d'autres saveurs de neutrinos ?

À ce stade de l'histoire des neutrinos, ces particules semblaient exclusivement liées à la radioactivité bêta et n'apparaître qu'en couple avec des électrons. Or, en 1936, **Carl Anderson** avait découvert les *muons* ( $\mu^-$  et  $\mu^+$ ), une nouvelle sorte d'électrons lourds et instables. Ce lien de famille suggéra que ces éphémères électrons avaient sans doute eux aussi

des neutrinos associés.

Effectivement, **Léon Lederman, Melvin Schwartz** et **Jack Steinberger**, découvrirent en 1963 à *Brookhaven*, des *neutrinos* (et *antineutrinos*) *muoniques* ( $\nu_\mu$ ) dans les produits de désintégration de faisceaux de pions chargés (eux-mêmes produits par bombardement d'une cible solide par un faisceau de protons de haute énergie). Les pions chargés se désintègrent ensuite en vol : ( $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \text{neutrino muonique}$ ) et ( $\pi^- \rightarrow \mu^- + \text{antineutrino muonique}$ ).

Lorsqu'en 1975, l'équipe de **Martin Perl** à *Stanford* découvrit des électrons super-lourds **tau** ( $\tau^+$  et  $\tau^-$ ), de durées de vie très courtes ( $10^{-13}$  seconde), la chasse aux *neutrinos tauiques* ( $\nu_\tau$ ) associés fut ouverte. Ils ne furent détectés qu'en 2000 au *FermiLab* (Chicago) dans les produits de décroissances d'électrons tau :  $\tau^+ \rightarrow (\mu^+ + \nu_\mu + \text{antiv}_\tau)$  ou ( $e^+ + \nu_e + \text{antiv}_\tau$ ).

Ainsi les trois *saveurs* de neutrinos découvertes venaient parfaitement compléter la composition des trois *familles* de fermions de la matière. Chaque famille étant constituée de deux *quarks* (u et d, pour la première famille, celle des éléments stables qui nous entourent) et deux *leptons* ( $e^-$  et  $\nu_e$ , pour cette première famille). Sans oublier bien sûr qu'à chaque *fermion* correspond un *antifermion* dans le monde de l'antimatière. Ce qui fait un tableau complet de 6 quarks, 6 antiquarks, 6 leptons (3 électrons et 3 neutrinos) et 6 anti leptons. Pourquoi existe-t-il trois familles de particules et seulement trois ? Pourquoi tous les fermions sont-ils massifs, sauf les neutrinos qui dans le *Modèle Standard* ont une masse nulle et sont en réalité dotés de masses extrêmement faibles ? Ces deux questions restent aujourd'hui encore sans réponses.

### L'asymétrie intrinsèque des neutrinos

Dans le cadre du *Modèle Standard*, les fermions doivent respecter au cours de leurs interactions les symétries fondamentales. En particulier leur *spin*, une grandeur vectorielle essentiellement quantique (un équivalent classique serait le moment angulaire intrinsèque d'une toupie) doit se projeter de façon *équiprobable* sur l'avant de la direction de propagation de la particule (on dit alors que son *hélicité* est *droite*) et sur l'arrière (*hélicité gauche*). Pour se donner une image dans le monde classique de ces qualificatifs (droite et gauche) on peut se référer au mouvement communiqué par un tire-bouchon. Lorsque les deux directions de projection du spin ne sont pas équiprobables, on dit qu'il y a *viol* des règles de symétrie.

Dès 1956, **Tsung-Dao Lee, Chen-Ning Yang** et **Chen-Shiung Wu** montrèrent en étudiant la désintégration  $\beta^-$  du  $^{60}\text{Co}$  que les électrons béta émis étaient exclusivement d'*hélicité gauche*. L'année suivante **Maurice Goldhaber** étendit cette étude aux désintégrations  $\beta^+$  et put conclure que le neutrino électronique était exclusivement d'*hélicité gauche*, tandis que son antiparticule, l'antineutrino était toujours d'*hélicité droite*. On attribua alors ce viol de parité à l'interaction faible, la seule interaction à laquelle les neutrinos soient sensibles.

Dans le cadre toujours du *Modèle Standard*, **Sheldon Glashow, Abdus Salam** et **Steven Weinberg** avaient en effet montré que l'interaction faible implique l'échange d'un *boson chargé* ( $W^+$  ou  $W^-$ ) ou d'un *boson neutre* ( $Z^0$ ). Les bosons  $W^{+/-}$  sont respectivement échangés au cours des rayonnements  $\beta^{+/-}$ . Quant au boson  $Z^0$  il est échangé au cours des très rares diffusions des neutrinos sur les électrons et les noyaux de la matière. La mesure en 1983 par **Carlo Rubbia** (travaillant auprès du *Super synchrotron* dont **Simon van der Meer** avait été le concepteur) de l'énergie de masse de ce boson neutre  $Z^0$  ( $91 \text{ GeV}/c^2$ ) fut une des grandes découvertes du CERN. Par ailleurs, la mesure de la durée de vie du  $Z^0$  ( $3.10^{-25}$  seconde) au collisionneur *LEP* du CERN dans les années 1998-2000 permit de confirmer qu'il n'y avait bien

que trois saveurs de neutrinos, ce qui laissait peu de place à l'existence évoquée par certains d'un quatrième neutrino (appelé *neutrino stérile*).

Revenons sur ce qu'implique le fait que les neutrinos soient *gauches* et les antineutrinos *droits*. Cette asymétrie est incompatible avec la théorie de **Paul Dirac**, incluse dans le Modèle Standard, qui prévoit que le neutrino, comme tous les autres fermions, devrait exister sous quatre états : neutrino *gauche*, neutrino *droit*, antineutrino *gauche* et antineutrino *droit*. Il se trouve que le théoricien **Ettore Majorana** (mystérieusement disparu en 1938, comme nous l'avait raconté notre confrère Georges Boulon dans sa communication du 23 janvier 2018) avait proposé en 1937 une théorie montrant qu'un neutrino s'il est massif peut être sa propre antiparticule. Dans ce cadre il n'y aurait alors plus que deux états possibles : un neutrino *gauche* et un antineutrino *droit* ... en accord avec l'expérience de Goldhaber ! Le débat est encore ouvert aujourd'hui : le neutrino est-il une particule de Dirac ou de Majorana ? Les deux neutrinos prévus par Dirac qui n'ont pas été observés (l'antineutrino *gauche* et le neutrino *droit*) n'existent-ils pas, ou y aurait-il un biais expérimental lié à la méthode de détection ? Seules des expériences très complexes, telle que la recherche en cours, d'un mode de radioactivité très rare, la *double désintégration bêta, sans émission de neutrinos*, permettront peut-être de trancher entre l'appartenance à Dirac ou à Majorana ?

### **Mais d'où viennent ces flux intenses de neutrinos qui nous traversent à notre insu ?**

Ils viennent en fait de partout, avec des énergies s'étalant de  $10^{-6}$  à  $10^{18}$  eV. Visitions quelques-unes de ces sources de neutrinos, qu'elles soient expérimentalement bien avérées ou encore seulement prédites :

1. **Notre corps**, car il contient des isotopes radioactifs  $\beta^-$ , notamment le Potassium ( $^{40}\text{K}$ ) qui décroît vers le Calcium ( $^{40}\text{Ca}$ ), en émettant des antineutrinos électroniques : une personne de 70 Kg, émet ainsi un flux d'environ 4 300 antineutrinos / seconde.
2. **Notre Planète**, en effet la Terre contient de nombreux éléments radioactifs bêta dans sa croûte et son manteau. Cette radioactivité émet un flux de 20 millions de *géoneutrinos* qui traversent notre corps par seconde.
3. **Les réacteurs nucléaires** : leur source d'énergie est la fission nucléaire, or les produits de fission sont le plus souvent radioactifs bêta. Il faut typiquement s'éloigner à plus de 1Km d'une centrale nucléaire, pour que le flux de neutrinos qu'elle émet devienne comparable à celui des neutrinos en provenance du Soleil.
4. **Les grands accélérateurs de particules** : nous avons vu que des protons de haute énergie envoyés sur une cible solide, produisent des faisceaux de pions chargés, particules instables, qui décroissent en neutrinos électroniques et muoniques.
5. **L'atmosphère** : les protons de hautes énergies des *rayons cosmiques* créent des pions en interagissant avec les atomes de l'atmosphère. Comme on l'a vu ci-dessus la composante chargée des pions décroît en gerbes de neutrinos. Par le jeu des décroissances, on s'attend à ce que le flux de ces *neutrinos atmosphériques* lorsqu'ils atteignent le sol comprenne deux fois plus de neutrinos muoniques que de neutrinos électroniques. Ces neutrinos ont des énergies qui s'étalent de  $10^6$  à  $10^{15}$  eV.
6. **Le Soleil** : dans le plasma d'hydrogène, comprimé en son cœur par la gravitation, on atteint des températures suffisantes pour que s'amorcent des réactions de *fusions nucléaires*, notées plus loin (**pp**). Cependant, la fusion directe de deux protons étant interdite par le *principe d'exclusion de Pauli* (car ce sont deux particules identiques), il faut laisser le temps à l'interaction faible (émettrice de neutrinos) de transformer

quelques protons en neutrons, puis en deutons. Le bilan global de cette « fusion assistée » par l'interaction faible, implique en fait 4 protons ( $4 p \rightarrow {}^4\text{He} + 2 e^+ + 2 \nu_e$ ). Ce sont ces réactions, dites (**pp**), qui font que le Soleil bombarde (jour et nuit) la Terre d'un flux de 60 milliards de neutrinos électroniques par seconde. Ces neutrinos (**pp**) sont très nombreux mais de relativement faibles énergies ( $< 1 \text{ MeV}$ ). D'autres neutrinos solaires sont émis avec de plus grandes énergies (donc plus faciles à détecter) mais leur flux est des ordres de grandeur plus faible, car ils proviennent des rares fusions qui ont lieu entre les noyaux d'hélium produits dans le cœur, appelés « cendres » des fusions (**pp**) de l'hydrogène. La fusion de ces cendres produit des neutrinos et des noyaux de Béryllium et de Bore ( ${}^7\text{Be}$  et  ${}^8\text{B}$ ).

7. **Le Cosmos :** la plupart des cataclysmes cosmiques sont accompagnés de l'émission de gerbes de neutrinos de très hautes énergies (de  $10^9$  à  $10^{17} \text{ eV}$ ). Le déroulement physique de certains de ces cataclysmes n'est d'ailleurs pas encore compris. Les premiers observés furent les explosions de *supernovæ*, qui signent la fin de vie des étoiles les plus massives. L'émission de neutrinos est due aux pressions énormes qui apparaissent au cœur de l'astre et permettent aux protons de se transformer en neutrons par capture des électrons environnants : ( $p + e^- \rightarrow n + \nu_e$ ).
8. **Le Big Bang :** l'Univers n'avait sans doute qu'une seconde d'existence, lorsqu'un flux gigantesque de *neutrinos fossiles* parvint à s'échapper de la soupe primordiale. Cet échappement de neutrinos eut lieu bien avant (380 000 ans) celui des photons fossiles du *fond diffus cosmologique*. Comme pour les photons fossiles, l'énergie initiale des neutrinos fossiles (qui était de l'ordre du Méga eV) a été fortement dégradée par l'expansion de l'Univers (jusqu'à des énergies de l'ordre du milli eV). Malheureusement, cet énorme flux de neutrinos fossiles (on pense qu'il est sur Terre  $10^{11}$  fois plus élevé que celui des neutrinos solaires) est d'énergie beaucoup trop faible pour être détectable à ce jour. Car plus l'énergie d'un neutrino est faible moins il a de chance d'interagir avec la matière. Cependant, en 2019, une preuve indirecte de l'existence des neutrinos fossiles a été avancée en étudiant la trace qu'ils auraient laissée en traversant le plasma primordial. Sous l'effet de l'inflation de l'Univers, ce plasma aurait été mis en vibrations, se traduisant par l'apparition d'*oscillations baryoniques acoustiques* (*BAO* en anglais) qui auraient structuré la distribution des baryons dans l'espace. Beaucoup plus tard, c'est la longueur d'onde de ces oscillations qui aurait déterminé la distance moyenne, de l'ordre de 500 millions d'années-lumière, que l'on peut observer aujourd'hui entre les galaxies primitives. La mesure de plus d'un million de distances intergalactiques (expérience *BOSS*) aurait ainsi permis d'identifier clairement la perturbation de ces oscillations due au passage du flux de ces neutrinos fossiles. Une retombée inattendue de cette étude fut de confirmer que ces neutrinos perturbateurs ne pouvaient être que de trois saveurs.

### La détection des neutrinos solaires et atmosphériques : naissance d'une énigme

Les neutrinos solaires furent détectés pour la première fois par une méthode chimique d'extraction, proposée dès 1946 par **Bruno Pontecorvo**, un collaborateur de Fermi. Il proposait de traquer l'apparition des isotopes radioactifs de l'argon ( ${}^{37}\text{Ar}$ ) dans une cible chlorée, bombardée par des neutrinos : ( $\nu_e + {}^{37}\text{Cl} \rightarrow {}^{37}\text{Ar} + e^-$ ). Cela impliquait la capacité d'extraire l'infime quantité d'argon apparaissant dans cette cible. C'est ce qu'entreprit **Ray Davis**, dès 1966, en plaçant un fût de 400 000 litres de  $\text{C}_2\text{Cl}_4$ , à 400 mètres de profondeur

(pour limiter le bruit de fond) dans la mine de *Homesake* dans le Dakota. Malheureusement cette méthode était cinématiquement insensible aux neutrinos solaires (**pp**), car ils sont de trop faibles énergies. Elle ne pouvait détecter que les neutrinos ( ${}^7\text{Be}$  et  ${}^8\text{B}$ ) plus énergétiques, mais très minoritaires, car issus de la fusion de l'hélium. A la demande de Davis, le théoricien **John Bahcall** estima qu'avec un tel équipement, le taux de comptage devrait être de l'ordre de seulement 10 neutrinos solaires par semaine, ce très faible taux de comptage prévu ne découragea cependant pas Davis.

En 1968, Davis publia qu'il avait réussi à détecter des neutrinos solaires, mais avec un taux de comptage en déficit de 65% par rapport aux prévisions de Bahcall. Avec une persévérance exceptionnelle, le couple Davies-Bahcall affina mesures et calculs jusqu'en 1988, date où ils confirmèrent la validité du déficit observé : ils avaient identifié un mystère ... qui allait perdurer plus de trente ans.

A partir de 1990, une autre expérience d'extraction chimique fut trouvée, capable de détecter les neutrinos solaires (**pp**), moins énergétiques mais beaucoup plus abondants. Il fallait extraire les isotopes radioactifs du Germanium apparaissant dans une cible de Gallium, issus de la réaction ( $\nu_e + {}^{71}\text{Ga} \rightarrow {}^{71}\text{Ge} + e^-$ ). C'était un défi, car la quantité de Gallium, nécessaire pour former la cible, excédait alors la production annuelle mondiale de cet élément. Deux expériences furent cependant entreprises : l'une *SAGE*, en Russie, avec 55 tonnes de Ga métallique, l'autre, au Japon, à 1 000 mètres de profondeur dans la mine de *Kamioka*. D'abord discordants, les résultats de ces deux expériences convergèrent enfin en 1992 : les deux équipes trouvaient un déficit de neutrinos (**pp**) d'environ 40% par rapport aux meilleures simulations de l'activité solaire.

Ce fut alors que des techniques propres à la physique des particules entrèrent en jeu, en traquant, dans une cible d'eau, les rares électrons produits par diffusion élastique des neutrinos solaires les plus énergétiques. En effet les électrons diffusés étant plus rapides que la vitesse de la lumière dans l'eau, produisent une onde de choc : le *cône de lumière Tcherenkov*. Cette lumière Tcherenkov bleue fut détectée en tapissant de photo détecteurs la surface extérieure de la cible d'eau. Cette méthode permit surtout de déterminer la direction de l'électron diffusé et donc celle du neutrino incident, à partir de la trace circulaire du cône Tcherenkov sur le panneau de détecteurs. En 1986, l'expérience japonaise *KAMIOKANDE*, installa à 1 000 mètres de profondeur dans la mine de *Kamioka*, un réservoir de 2 100 litres d'eau, entouré de 11 000 photomultiplicateurs. Ils détectèrent ainsi des neutrinos solaires de haute énergie ( ${}^8\text{B}$ ) et publièrent la première *image-neutrino* du Soleil, visualisant la zone centrale où ont lieu les réactions de fusion (le diamètre de cette source de neutrinos est beaucoup plus petit que celui du Soleil que l'on voit). Cette expérience confirma qu'il y avait bien un déficit de neutrinos solaires, mais qu'il était de 55% par rapport au flux prévu.

Par ailleurs, les expériences de détection des *neutrinos atmosphériques* dès qu'elles furent capables d'identifier les neutrinos électroniques parmi les neutrinos muoniques issus des gerbes cosmiques, convergèrent toutes vers la conclusion que le rapport 2 qui était attendu entre les flux muoniques et électroniques était bien observé dans les flux « descendants » des neutrinos venant du ciel. Mais il y avait un déficit de 40% en neutrinos muoniques dans les neutrinos « montants », ceux qui étaient détectés après avoir traversé la Terre de part en part. Ces mystérieux déficits observés de neutrinos, solaires et atmosphériques montants, avaient-ils une cause commune ?

**La solution de l'énigme : les neutrinos oscillent entre leurs différentes saveurs**

Dès 1957, **Bruno Pontecorvo**, avait prédit que si les neutrinos de différentes saveurs étaient dotés de masses faibles et différentes les unes des autres, ils pourraient alors changer périodiquement de saveur (on dit *osciller*) au cours de leur propagation, tant dans le vide que dans la matière. Ce processus, de nature purement quantique, s'interprète en affectant aux neutrinos trois *états propres de saveurs* et trois *états propres de masses* ayant chacun une vitesse propre de propagation. Au cours du vol d'un neutrino apparaît ainsi une *superposition cohérente* des trois états propres de masse. C'est grâce à l'interférence entre ces trois ondes de différentes vitesses que le neutrino change périodiquement de saveur.

Le calcul montre qu'un neutrino d'énergie  $E$  et de saveur initiale donnée (par exemple ici *muonique*), après une distance de vol  $L$ , a une probabilité  $P$  d'avoir oscillé vers une autre saveur (ici *électronique*) :  $P_{\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e} = \sin^2(2\theta) \cdot \sin^2(\Delta m^2 L / 4E)$ , où  $\theta$  est l'*angle de mélange* entre les états propres de masses et  $\Delta m^2$  le carré des écarts de masses entre les deux saveurs ( $\Delta m^2 = m_e^2 - m_{\nu}^2$ ). Cette relation montre que la mesure de la probabilité d'oscillation ne donne accès qu'aux *différences de masses* entre les neutrinos mais malheureusement pas à leur masses absolues. Cet exemple d'une oscillation entre deux saveurs fut étendu au cas général où le neutrino oscille entre ses trois saveurs. La théorie montra aussi que lorsque le neutrino traverse de la matière, sa fréquence d'oscillation est plus rapide que dans le vide, car il peut alors interagir avec les noyaux des atomes de la matière traversée, par échange de bosons  $Z$  ou  $W$ . La prise en compte de cette théorie de l'oscillation permet d'interpréter les mystérieux déficits qui avaient été observés dans la détection des neutrinos solaires et atmosphériques. Il fallait en fait tenir en compte de trois paramètres : la saveur du neutrino à sa naissance ( $\nu_e$  pour les neutrinos solaires,  $\nu_e$  et  $\nu_{\mu}$  pour les atmosphériques) ; les distances de vol parcourues par les neutrinos, respectivement dans le vide et dans de la matière ; et enfin l'énergie du neutrino détecté.

**En ce qui concerne les neutrinos solaires**, les déficits observés dans les premières expériences par extraction chimique s'expliquent par le fait que les neutrinos qui avaient oscillés de  $\nu_e$  vers  $\nu_{\mu}$  n'étaient pas comptés. Quant à la différence des déficits trouvés dans les expériences d'extraction ( $^{37}\text{Ar}$  et  $^{71}\text{Ge}$ ) elle s'explique par la différence en énergie des neutrinos qui étaient détectés. Dans les calculs actuels, il est tenu compte de l'accélération des oscillations des neutrinos à l'intérieur du Soleil, depuis le cœur jusqu'à la surface (les neutrinos font ce trajet en 2 secondes, contre 200 000 ans pour les photons). Cependant l'étude des neutrinos solaires se poursuit actuellement dans des expériences plus lourdes, au Canada (*SNO*), au Japon (*KAMLAND*) et au Gran Sasso (*BOREXINO*), qui vont détecter simultanément toute la gamme en énergie des neutrinos solaires.

**Pour les neutrinos atmosphériques**, le déficit de 40% en  $\nu_{\mu}$  qui était observé dans les gerbes « montantes » s'explique par l'effet de l'oscillation  $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e$  qui a lieu pendant le long trajet (13 000 Km) de la traversée de la Terre. Alors que dans les gerbes « descendantes » le trajet entre l'atmosphère et la Terre est trop court (20 Km) pour que l'oscillation ait le temps de se manifester.

**NB** : Nous n'avons pas présenté ici les nombreuses expériences développées depuis 1990 pour détecter les antineutrinos électroniques émis par les réacteurs à fission (en France au *Buggey* et à *Chooz*, à *Daya Bay* en Chine et à *Reno* en Corée du Sud) car, après de nombreuses années de tâtonnements, les résultats actuels semblent en bon accord avec les meilleures prédictions des flux de neutrinos émis par les cœurs.

## D'où vient la (très faible) masse des neutrinos ?

Nous venons de voir que pour pouvoir osciller les neutrinos doivent être massifs. Mais aussi que les oscillations ne renseignent que sur les *écarts entre les masses* des neutrinos. A ce jour, la seule méthode pour estimer les *valeurs absolues de leurs masses* est l'étude de la « queue » des spectres d'électrons de désintégration bêta. Ces mesures sont en cours en Allemagne, à Karlsruhe, où le spectromètre **KATRIN** (poids de 200 tonnes, longueur de 70 m) a été conçu pour éliminer tous les électrons de basse énergie (le transport jusqu'à Karlsruhe de ce volumineux équipement, assemblé en Bavière, a nécessité un détour rocambolesque de 9000 Km le long des mers et fleuves européens). Le premier résultat publié en 2019 donne une limite supérieure (1,1 eV) à la masse du neutrino électronique.

Rappelons que dans le cadre du *Modèle Standard*, les fermions devraient tous être à la fois *gauches* et *droits* et avoir acquis leur masse en traversant le *champ de Higgs*. Les neutrinos ne pouvant pas être interprétés par ce modèle, d'autres modèles alternatifs ont été imaginés, notamment pour expliquer leurs très faibles masses. Dans l'un d'eux, il faut imaginer que ce neutrino (*gauche*) soit en interaction avec un hypothétique neutrino *droit* dont la masse serait si élevée (jusqu'à  $10^{15}$  fois la masse du proton) qu'elle serait restée jusqu'à aujourd'hui totalement inobservable. Dans le cadre de cette théorie, dite de la *balançoire*, la masse du neutrino gauche est inversement proportionnelle à celle de son partenaire (super-lourd) *droit*. Cette *balançoire* expliquerait ainsi que la masse du neutrino gauche soit si faible ... reste à détecter l'existence du super lourd sur l'autre plateau.

### Étude approfondie du phénomène d'oscillation, à partir de faisceaux de neutrinos

Nous avons vu que l'on sait produire des faisceaux de neutrinos d'une saveur donnée à partir de faisceaux de protons de haute énergie. Par exemple, la production de neutrinos de saveurs muoniques mono-énergétiques se fait par la cascade suivante : **protons -> cible ->  $\pi^+$  ->  $\mu^+$  ->  $\nu_\mu$** . Grâce à la rotondité de la Terre, ce faisceau lorsqu'il est dirigé vers un détecteur très éloigné traverse en ligne droite une partie de la croûte terrestre avant d'être détecté. La distribution des saveurs des neutrinos après un parcours souterrain de longueur bien définie, permet l'étude de leur oscillation dans la matière,

En 2000, les japonais de l'expérience *T2K* furent les premiers à utiliser leur accélérateur de protons de *Tokai*, sur la côte Est, pour produire un faisceau de neutrinos muoniques et à le diriger vers leur détecteur de neutrinos *Kamiokande* situé à 250 Km sur la côte Ouest, dans la mine de *Kamioka*. Ils observèrent l'effet de l'oscillation d'une part par un déficit en neutrinos de la saveur initiale (muonique) et d'autre part par l'apparition de neutrinos d'une nouvelle saveur (électronique).

En 2006, les européens utilisèrent l'accélérateur *SPS* du CERN (Genève) pour produire un faisceau de neutrinos muoniques et viser, 730 Km au Sud, le détecteur italien du Gran Sasso. Cette expérience, *OPERA*, permet d'observer, mais avec une faible statistique, le phénomène d'oscillation par l'apparition de quelques neutrinos tauiques.

Aujourd'hui tous les efforts internationaux se regroupent autour de l'expérience américaine *DUNE* qui devrait, dès 2025, permettre de produire un faisceau de neutrinos à partir de *FermiLab* (Chicago) et de viser, 1300 Km au Sud, le détecteur souterrain de *Sanford* (Dakota du Sud). Le détecteur de neutrinos à Argon liquide sera celui développé par les physiciens d'*OPERA*. Cet équipement *DUNE* devrait permettre d'affiner tous les

paramètres des oscillations et déterminer avec précision les différences de masses entre neutrinos.

### **Les neutrinos oscillent-ils comme leurs antineutrinos ?**

#### **Une clef pour élucider le mystère de la disparition de l'antimatière dans l'Univers ?**

Le 16 avril 2020, la *une* de la revue *Nature* met en valeur un résultat de l'expérience japonaise *T2K* portant sur dix ans de prises de données avec le détecteur *Super-Kamiokande*, dans le but de mesurer les oscillations respectives entre saveurs à partir de faisceaux de neutrinos, puis d'antineutrinos, produits 295 Km en amont, depuis *Tokai*. A partir d'un nombre modeste de particules détectées (90 pour les neutrinos et 15 pour les antineutrinos) ils annoncent que les antineutrinos oscillent nettement plus vite que les neutrinos, un comportement qui brise la symétrie miroir attendue entre matière et antimatière. Le degré de confiance de ce résultat est relativement faible : 95 %, alors que la validation d'un résultat en physique des particules requiert habituellement un degré de confiance de 99,9999 %. Néanmoins, la revue a estimé que l'enjeu de cette découverte est tel qu'il méritait publication, dans l'attente de sa probable confirmation par les multiples expériences en cours de montage : *JUNO* qui sera disponible en 2022 en Chine, *DUNE* en 2025 aux USA et *Hyper-Kamiokande* en 2027 au Japon. En effet, l'asymétrie observée par *T2K* pourrait à elle seule expliquer la disparition totale de l'antimatière après le Big Bang. Ce serait aussi reconnaître la validité de la théorie d'**Andrei Shkarov**, qui dès 1967, corrélait la disparition de l'antimatière à de tels viols de symétries.

### **Les télescopes à neutrinos**

Nous avons vu qu'un des grands avantages de la détection des neutrinos par le rayonnement Tcherenkov, était que l'axe du cône de lumière est dans la direction du neutrino incident, une information fondamentale pour localiser dans l'espace les sources des neutrinos cosmiques, c'est-à-dire, transformer le détecteur en un télescope.

Plusieurs installations sont actuellement fondées sur l'équipement d'immenses volumes d'eaux profondes (pour diminuer le bruit de fond et être dans l'obscurité totale) de matrices de photo-détecteurs permettant de reconstituer les cônes de lumière Tcherenkov induits par les neutrinos qui « descendent » du ciel mais surtout par ceux qui « remontent » car ils concernent des neutrinos ayant traversé la Terre de part en part.

Deux types de volumes d'eau ont été imaginés pour construire ces télescopes à neutrinos : soit de profondes fosses marines (ou lacustres) d'eau liquide, un milieu optique très transparent et homogène, soit des glaces profondes que l'on trouve dans les glaciers très épais : un milieu optique moins homogène mais parfaitement immobile.

Le premier équipement marin (*ANTARES*) fut implanté dans les fonds profonds de la Méditerranée, près de Toulon, où furent plongés des câbles verticaux porteurs d'une guirlande de photomultiplicateurs. Les traces des neutrinos ont été clairement observées. Mais deux problèmes furent mis en évidence : d'une part la présence de forts courants marins en profondeur, d'autre part l'importante perturbation optique due à la bioluminescence des poissons des abysses. Cette expérience européenne va être transformée en *KM3NET*, qui utilisera un volume d'eau beaucoup plus grand, équipé d'un plus grand nombre de lignes de photo détecteurs. De leur côté, les Russes, sont en train d'assembler l'expérience *Gigatone Volume Detector* dans une zone très profonde du lac

Baïkal, un milieu liquide dépourvu de courants de fond.

L'expérience **IceCube**, quant à elle, est localisée sur le continent antarctique. Elle exploite l'équipement d'un cube de glace de 1 Km<sup>3</sup>, situé entre 1450 m et 2450 m de profondeur dans un des glaciers les plus épais et les plus stables de la planète. Mais c'est aussi dans un des lieux les plus froids de la planète, ce qui entraîne des conditions d'exploitation extrêmement difficiles. Le rayonnement Tcherenkov des neutrinos dans ce cube est mesuré par 5160 détecteurs répartis le long de 86 puits verticaux. La propagation de la lumière Tcherenkov est plus complexe dans le glacier que dans l'eau liquide, car le volume utilisé du glacier est en fait composé de 100 000 strates, chaque strate correspondant à l'épaisseur d'une chute de neige annuelle. Pour calculer la direction d'un neutrino il faut ainsi faire un lourd travail de reconstitution des trajectoires optiques de la lumière Tcherenkov dans toutes les strates traversées. Néanmoins cet équipement qui est en cours d'extension (en volume et en nombre de photo détecteurs) a déjà permis de détecter et de mesurer la direction spatiale de centaines de neutrinos cosmiques d'énergies incroyablement élevées, atteignant des millions de milliards d'électronvolts. L'origine des événements cosmiques capables d'émettre des neutrinos de telles énergies est encore largement inconnue. Il est remarquable que ce télescope à neutrinos ait déjà pris sa place dans la nouvelle astronomie multi messagers.

### Conclusion

Après un siècle de recherches persévérantes, les neutrinos n'ont donc pas encore dévoilé la complexité de leur nature et de leurs origines. Citons les points non résolus :

1. Quelle est la **masse absolue** de chacun des neutrinos ? Les mesures de l'expérience *KATRINA* sont très attendues pour valider la théorie de la « balance » et mieux évaluer la contribution de l'ensemble des neutrinos à la masse totale de l'Univers.
2. Leur **nature**, est-elle de **Dirac** ou de **Majorana** ? La mise en évidence de doubles désintégrations bêta, sans émission de neutrinos, devrait permettre de trancher.
3. Une équipe à *Los Alamos*, défend l'existence d'un **neutrino stérile**, une quatrième saveur qui serait lourde et sensible seulement à l'interaction gravitationnelle ?
4. **Neutrinos** et **antineutrinos** oscillent-ils à la même vitesse ? La confirmation de l'expérience japonaise, suggérant une grande différence de vitesse d'oscillation entre une particule et son antiparticule, serait sans doute la clef de l'énigme de l'absence d'antimatière dans l'Univers actuel.
5. Quelles sont les **sources cosmiques** des neutrinos d'ultra-hautes énergies détectés par IceCube ? La réponse viendra sans doute des observations croisées de la toute nouvelle astronomie « multi-messagers ».
6. Enfin, à l'autre extrémité de l'échelle des énergies, pourra-t-on un jour accéder à une **détection directe des neutrinos fossiles**, malgré leurs ultra-basses énergies ? Cela permettrait de mieux comprendre leur rôle dans la structuration de l'Univers.

**Bibliographie** : voici deux ouvrages grand public (sans équations) sur les neutrinos :

- *A la recherche des neutrinos*, de A. Kouchner et S. Lavignac (Ed Dunod, 2018)
- *Les neutrinos*, collection *Voyage dans le Cosmos* de H. Reeves (Ed RBA 2016)

**Remerciements** chaleureux à nos confrères : Philippe Mikaeloff, pour m'avoir suggéré le thème de cette communication, et Jean-Paul Martin, pour la relecture de ce texte.