

# Les neutrinos, des particules surprenantes !

Thierry Lasserre  
*Physicien au CEA*

## Qu'est-ce qu'un neutrino ?

Tout comme l'électron, le neutrino est une particule élémentaire, c'est à dire un constituant de la matière qui ne nous apparaît pas aujourd'hui comme composé d'éléments encore plus petits. On le désigne par la lettre grecque  $\nu$ . Dans la nomenclature des physiciens des particules, il appartient à la catégorie des leptons qui comprend aussi l'électron, le muon, et le tau. Les deux derniers sont des cousins de l'électron, mais respectivement 200 fois et 3500 fois plus massifs. Les leptons sont organisés en trois familles associées: électronique, muonique, et tauique. Nous verrons qu'il existe trois types de neutrinos (on parle souvent de trois saveurs). A chaque lepton correspond un anti-lepton, de même masse, mais de charge électrique opposée. Les leptons possèdent un spin<sup>1</sup>  $\frac{1}{2}$ , ils appartiennent donc à la catégorie plus générale des fermions (du nom d'Enrico Fermi).

Selon le modèle standard de la physique des particules (MSPP), la masse des neutrinos est nulle. Toutefois, nous verrons qu'une série d'expériences a démontré qu'elle est différente de zéro, encore que très petite par rapport à celles des autres leptons (au moins 250 000 fois plus faible). C'est une découverte fondamentale très récente qui va sans doute faire évoluer le MSPP dans les prochaines années.

A l'échelle du noyau atomique, les neutrinos interagissent uniquement par l'intermédiaire de l'interaction faible car ils sont insensibles aux interactions forte et électromagnétique. En effet, ils ne portent ni de charge de couleur, ni de charge électrique. En conséquence, la probabilité d'interaction d'un neutrino avec la matière est extrêmement faible : un neutrino issu d'une désintégration radioactive traverse, en moyenne, une épaisseur de plomb d'une année-lumière (dix mille milliards de kilomètres) avant d'interagir !

## Découverte des neutrinos

Au début du XX<sup>e</sup> siècle, la radioactivité à peine découverte était soigneusement étudiée au sein des laboratoires. Les désintégrations de type  $\beta$  (bêta) étaient déjà identifiées comme responsables de la transmutation d'un noyau atomique en un autre élément voisin dans la classification de Mendeleïev. Lors d'un processus  $\beta$ , le noyau radioactif émet un électron (ou rayon  $\beta$ ) et change sa charge électrique d'une unité, en transformant un proton en neutron ou vice versa.

---

<sup>1</sup> Le spin est une caractéristique intrinsèque d'une particule élémentaire, tout comme la masse et la charge. C'est une grandeur analogue à un moment angulaire quantifié selon les lois de la mécanique quantique. Le long du mouvement de la particule le spin des leptons peut prendre les valeurs  $+1/2$  ou  $-1/2$ , selon que la particule « tourne sur elle-même » dans le sens des aiguilles d'une montre ou dans le sens inverse.

Un exemple familier est celui du tritium  $^3\text{H}$ , l'isotope le plus lourd de l'hydrogène (1 proton et 2 neutrons), qui se désintègre en hélium  $^3\text{He}$  (2 protons et 1 neutron) et émet un électron.

Les expérimentateurs de l'époque entreprirent de mesurer précisément l'énergie de l'électron émis, afin de mieux comprendre la structure des noyaux atomiques. D'après les lois de conservation de l'énergie et de l'impulsion<sup>2</sup>, ils savaient prédire le partage d'énergie qui devait s'opérer *uniquement* entre l'électron et le noyau de recul. L'électron devait en principe toujours emporter la même quantité d'énergie. A la grande stupéfaction de tous, James Chadwick montra en 1914 que tel n'est pas le cas : les électrons ont un spectre continu en énergie, entre zéro et l'énergie attendue dans le cas d'une réaction à deux corps ! Cela pouvait signifier qu'une partie de l'énergie s'évanouissait dans les processus  $\beta$  ...

En 1930 le physicien Wolfgang Pauli se risqua à sauver la loi sacro-sainte de la conservation de l'énergie en proposant, selon ses propres termes, « *un remède désespéré* ». Il invoqua l'existence d'une nouvelle particule partageant l'énergie du processus  $\beta$  avec l'électron et le noyau. Afin de s'ajuster aux données expérimentales, cette nouvelle particule devait être électriquement neutre, de spin demi entier, et de masse inférieure à celle de l'électron. Cette particule, fut nommée plus tard neutrino, littéralement « petit neutre », par Fermi. Une fois créé, le neutrino s'échappait de la zone de détection à une vitesse très proche de celle de la lumière, et laissait croire, si on l'ignorait dans le bilan de la réaction, que la loi de conservation de l'énergie était violée. Peu de temps après, le génial Fermi formula une théorie mathématique des désintégrations  $\beta$  qui rendait parfaitement compte de tous les résultats expérimentaux. Il introduisit la notion de *force faible* (en comparaison à la force électromagnétique) qui transforme un proton en un neutron, en créant simultanément un électron et un anti-neutrino. Aussitôt, Hans Bethe et Rudolf Peierls suggérèrent une réaction permise par la théorie de Fermi pour détecter indirectement l'insaisissable : la capture d'un neutrino (ou anti-neutrino) par un noyau et l'émission simultanée d'un électron (ou anti-électron). Malheureusement la petitesse de la force faible semblait réduire leurs espoirs à néant ...

En 1951, les physiciens de Los Alamos Fred Reines et Clyde Cowan, qui travaillaient alors sur les essais nucléaires américains, songèrent utiliser la bouffée considérable de neutrinos électroniques émise dans la furie d'une explosion atomique<sup>3</sup> afin de détecter une poignée de neutrinos. La réaction la plus prometteuse était la désintégration  $\beta$  inverse,  $\text{anti-}\nu_e + p \rightarrow e^+ + n$ , où  $p$  est le noyau d'hydrogène (proton),  $e^+$  l'anti-électron (ou positron), et  $n$  le neutron. Ils usèrent de la technique des liquides scintillants, découverts quelques années auparavant. De tels liquides aromatiques servent à la fois de cible puisqu'ils contiennent énormément de protons et de milieu de détection car ils permettent de « matérialiser » les traces que laissent le positron et le neutron<sup>4</sup>. En effet, un bref flash de lumière visible (quelques nanosecondes) est émis chaque fois qu'une particule chargée ou un rayon gamma traverse le milieu. Cette lumière, dont l'intensité est proportionnelle à l'énergie des particules incidentes, est ensuite collectée par des capteurs ultrasensibles aux photons visibles, appelés tubes photomultiplicateurs (TPM). Les flashes lumineux sont alors convertis en signaux électriques et enregistrés pour l'analyse.

---

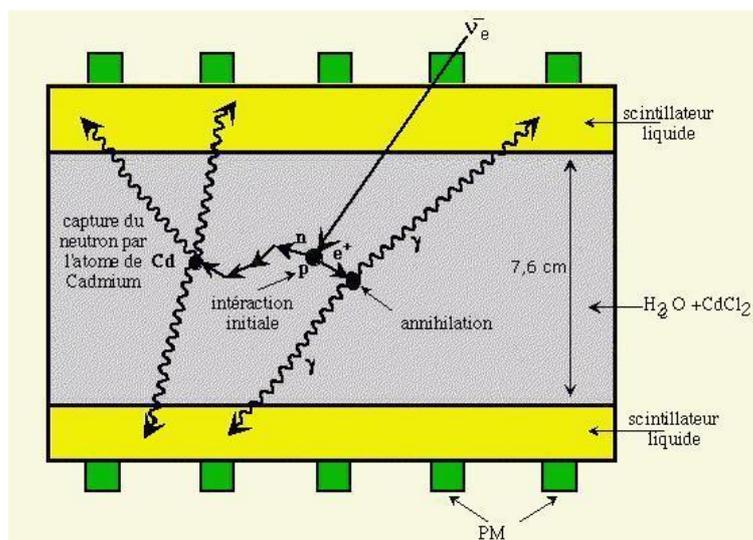
<sup>2</sup> A des vitesses très inférieures à la vitesse de la lumière, l'impulsion n'est autre que la quantité de mouvement (masse \* vitesse).

<sup>3</sup> Seules les bombes à fission (bombes A) émettent des neutrinos. Les bombes à hydrogène (bombe H) utilisent la fusion du deutérium et du tritium pour produire un noyau d'hélium et un neutron, sans émission de neutrinos. Cependant, une bombe A est utilisée pour allumer une bombe H.

<sup>4</sup> Le neutron commence par ralentir par chocs successifs sur les noyaux légers du milieu (phase de thermalisation), puis il est capturé par un noyau (hydrogène, cadmium); cette réaction est instantanément suivie de l'émission d'une bouffée de rayons gammas.

Après de longues réflexions, la faisabilité d'une telle expérience, à 20 mètres d'une explosion atomique, était en question, et les deux confrères se tournèrent vers une autre source de neutrinos plus facile à apprivoiser. Les réacteurs nucléaires fonctionnent sur le principe de la fission d'un mélange judicieux de noyaux dits fissiles, principalement l'uranium 235 et le plutonium 239. Baignés par un flux de neutrons dans le cœur d'un réacteur, ces noyaux se scindent en deux morceaux (ils fissionnent) tout en libérant de l'énergie, et quelques neutrons qui entretiennent la réaction (voir Figure 12). L'inconvénient de la fission est que presque tous les fragments émis et les autres produits de réaction sont radioactifs, et se désintègrent jusqu'à atteindre une configuration stable<sup>5</sup>. Or, chaque désintégration radioactive  $\beta$  engendre un neutrino électronique (ou un anti-neutrino).

Les réacteurs sont ainsi des sources copieuses, cependant mille fois moins intense qu'une explosion nucléaire de 20 kilotonnes (à l'époque). En 1956, après plusieurs années d'efforts, Reines et Cowan installèrent un détecteur de 4 200 litres de liquide scintillant, et d'eau contenant une faible quantité de cadmium pour favoriser la détection des neutrons (voir Figure 2), près du réacteur nucléaire de Savannah River, en Caroline du sud. Après quelques mois de prise de données ils identifièrent les interactions des anti-neutrinos électroniques. Le signal était 5 fois plus faible quand le réacteur était à l'arrêt pour maintenance. Après tous les tests de rigueur, la découverte fut annoncée par télégramme à Pauli en juin 1956. Reines obtint le prix Nobel de physique en 1995 (Cowan étant malheureusement décédé en 1974). Notons qu'au cours de cette expérience, Reines et Cowan mesurèrent aussi la probabilité d'interaction des neutrinos, grandeur couramment appelée *section efficace*, en conformité avec la prédiction de la théorie de Fermi.



**Figure 1: Principe de détection des anti- $\nu_e$  dans l'expérience de Reines et Cowan.** Un anti- $\nu_e$  interagit sur un noyau d'hydrogène de l'eau. Il y a production instantanée d'un positron et d'un neutron. Le positron s'annihile avec un électron du milieu, et deux photons gamma sont émis ; ces derniers sont détectés par leurs interactions dans le scintillateur liquide. Le neutron commence par ralentir par collisions, puis il est capturé par un noyau de Cadmium ; cette capture est suivie par l'émission de photons gamma qui sont détectés dans le scintillateur liquide.

## Trois neutrinos

<sup>5</sup> Ces fragments dont la durée de vie excède quelques années constituent les déchets nucléaires qui nécessitent un traitement particulier.

Dès les années 50 on savait qu'un muon se désintègre en un électron et deux neutrinos :  $\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu + \bar{\nu}$ . On en suspectait qu'un neutrino était associé à l'électron (celui de Reines et Cowan) et l'autre au muon. En 1963, Léon Lederman, Mel Schwartz, et Jack Steinberger, réalisèrent une expérience ingénieuse à Brookhaven (Etats-Unis) pour déterminer si ces deux neutrinos sont identiques ou distincts.

Ils utilisèrent un accélérateur de protons de 30 GeV<sup>6</sup> comme source de neutrinos. Un

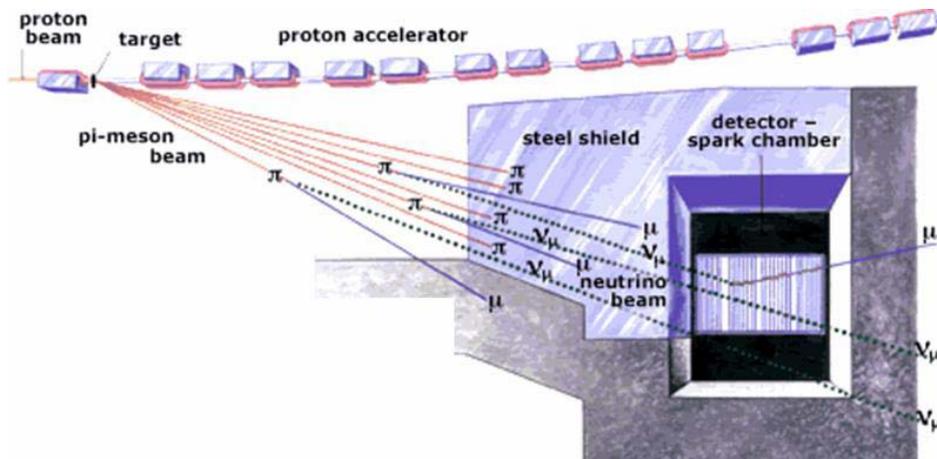


Figure 2: Principe de l'expérience de mise en évidence du neutrino muoniques.

faisceau de protons dirigé sur une cible de béryllium produit une myriade de pions<sup>7</sup> par l'intermédiaire de l'interaction forte. Les pions chargés se désintègrent en muons et en neutrinos par interaction faible. Les muons se désintègrent à leur tour comme expliqué ci-dessus. Derrière une zone de désintégration, les expérimentateurs ajoutent un écran de terre ou de métal d'une dizaine de mètres d'épaisseur pour éliminer les particules indésirables. Grâce à leur formidable pouvoir de pénétration seuls les neutrinos jaillissent en sortie. L'expérience était agencée de telle sorte que la majorité de neutrinos arrivant en zone de détection provenait de la désintégration des pions. Le détecteur (une chambre à étincelles), placé à quelques dizaines de mètres, était adapté pour discriminer un électron d'un muon. En effet, un muon se matérialise par une longue trace continue, alors qu'un électron, deux cent fois plus léger, dessine une trajectoire plus erratique. L'expérience mit en évidence beaucoup plus des traces de type muonique que de traces de type électronique. Le neutrino produit lors de la désintégration d'un pion (positif) ne peut se transformer qu'en muon, mais pas en électron :  $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$ . Si le neutrino électronique était identique au neutrino muonique on aurait découvert presque autant de traces de chaque saveur. Il existe donc un neutrino spécifiquement associé au muon, noté  $\nu_\mu$ . Lederman, Schwartz, et Steinberger furent gratifiés du prix Nobel de physique en 1988 pour cette découverte.

Ce résultat permit non seulement de mettre en évidence une deuxième saveur de neutrino, mais en plus de démontrer l'existence de deux familles bien distinctes de leptons. Dans le MSPP il est d'usage d'associer un nombre quantique spécifique à chaque famille, appelé nombre leptonique électronique, muonique, ou tauique. Nous verrons par la suite que ce nombre leptonique, introduit de façon ad hoc dans le MSPP, n'est en fait pas toujours conservé.

<sup>6</sup> L'électron volt (eV) et ses multiples de 1 million (MeV) et de 1 milliard (GeV) sont les unités de masse et d'énergie de la physique des particules. La masse d'un électron est de 0,5 MeV, et celle d'un proton d'environ 1 GeV.

L'équivalence masse énergie provient de la célèbre équation  $E=mc^2$ , où c est la vitesse de la lumière.

<sup>7</sup> Les pions sont des particules légèrement plus massives que le muon, de spin 0, et constituées d'un quark et d'un anti-quark. Il existe trois pions de charge électrique  $-1, 0, +1$ , notés  $\pi^-, \pi^0, \pi^+$ .

Trois familles seulement existent dans le modèle standard, sans que l'on sache pourquoi. Le tableau serait donc incomplet si je ne mentionnais pas le neutrino tauique, noté  $\nu_\tau$ , qui fut observé directement seulement en l'an 2000.

## Les neutrinos dans le modèle standard

Au sein du MSPP, on regroupe les leptons selon les couples  $(e, \nu_e)$ ,  $(\mu, \nu_\mu)$ , et  $(\tau, \nu_\tau)$ , qui définissent le secteur des leptons. Dans cet exposé, je passerai volontairement sous silence les subtilités relatives au spin et à la projection du spin du neutrino le long de sa trajectoire (même si celles-ci jouent un rôle capital dans l'interaction faible). Les interactions entre particules sont maintenant bien comprises, et dans le MSPP deux fermions interagissent en échangeant un boson<sup>8</sup>. L'interaction faible se modélise par les échanges d'un trio de bosons  $W^+$ ,  $W^-$ ,  $Z^0$ . Contrairement au photon de masse nulle, ces trois bosons sont entre 80 et 100 fois plus lourds que le proton ! C'est ce qui explique la très faible portée de l'interaction faible.

Prenons maintenant l'exemple concret de la désintégration bêta (voir Figure 3). La réaction  $n \rightarrow p + e^- + \text{anti-}\nu_e$  est en fait la transformation d'un quark de type « down » ( $d$ ) du neutron en un quark de type « up » ( $u$ ) et un boson  $W^-$ , qui se désintègre à son tour en une paire ( $e^-$ ,  $\text{anti-}\nu_e$ ). Le neutron composé de trois quarks  $(u,d,d)$  devient le trio de quarks  $(u,u,d)$ , qui n'est autre qu'un proton. Les interactions qui font intervenir les  $W$  sont appelées « courant chargés », car ils transforment le neutrino en son lepton associé (ou inversement) en modifiant la charge électrique d'une unité. Les interactions impliquant le boson  $Z^0$  sont désignées « courants neutres » car elles laissent inchangés les deux fermions qui interagissent. Ces dernières sont plus subtiles et elles ont seulement été découvertes en 1973, au CERN, en utilisant un faisceau de neutrinos muoniques et une chambre à bulles en guise de détecteur. Enfin, en 1989, l'étude de la durée de vie du  $Z^0$  au collisionneur électron-positron du CERN (le LEP) a montré qu'il n'y a que trois saveurs de neutrinos légers se couplant avec la matière.

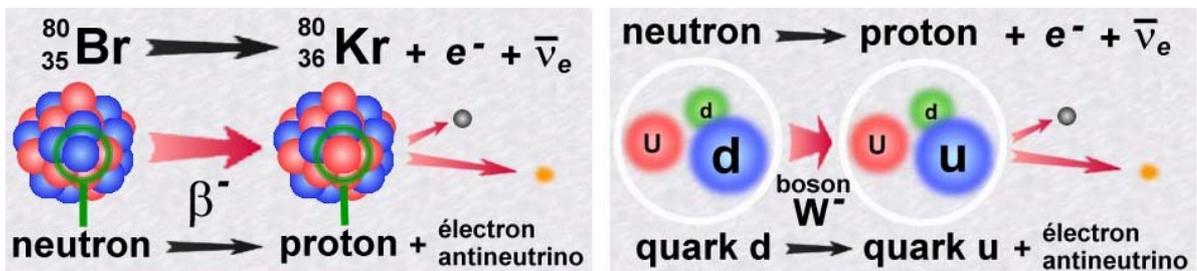


Figure 3: Désintégration  $\beta$  (de type -) du Brome 80 en Krypton 80, dans le cadre de la théorie de Fermi (à gauche), et la même réaction dans le cadre du MSPP (à droite). Dans les deux cas la réaction fondamentale est la conversion d'un quark ( $d$ ) en un quark ( $u$ ) avec émission d'un électron et d'un  $\text{anti-}\nu_e$ .

## Les sources de neutrinos

Fort heureusement pour les physiciens des particules, les sources de neutrinos sont diverses et variées. On distingue les sources naturelles et les sources artificielles. Il est tout aussi important d'identifier la saveur des neutrinos qui naissent de ces fontaines de particules, et de comprendre les mécanismes de production. J'ai déjà évoqué les explosions de bombes à fission et les réacteurs nucléaires qui émettent des  $\text{anti-}\nu_e$ . Les accélérateurs de particules actuels permettent essentiellement de produire des  $\nu_\mu$  ou  $\text{anti-}\nu_\mu$ . Le corps humain contient 20 milligrammes de

<sup>8</sup> Du nom du physicien Bose, un boson est une particule de spin entier. Par exemple, le photon de masse nulle et de spin 1 véhicule les interactions électromagnétiques.

l'isotope 40 du potassium (émetteur  $\beta$ ) : chaque jour, 400 millions de neutrinos s'échappent de nos os à une vitesse proche de celle de la lumière ! L'atmosphère est le siège de réactions produisant  $\nu_\mu$  et  $\nu_e$  et leurs antiparticules. Le soleil émet uniquement des  $\nu_e$ . Certaines explosions d'étoiles (supernovae de type II) produisent une quantité astronomique de neutrinos des trois saveurs et de leurs antiparticules. Les noyaux actifs de galaxie où siègent de gigantesques trous noirs en font probablement de même. Enfin, un rayonnement fossile de neutrinos et d'anti-neutrinos des trois saveurs baigne l'univers depuis les premières secondes qui suivirent le Big-Bang.

Voyons maintenant comment certaines de ces sources sont exploitées pour percer les mystères de ces surprenants neutrinos.

## Les neutrinos solaires : la fin d'une énigme

Le Soleil, plus massif et plus brillant que la majorité des étoiles, est au milieu de son cycle de vie. Il puise son énergie de la réaction de fusion de deux protons conduisant à la conversion de l'hydrogène en hélium en son cœur, en émettant deux  $\nu_e$ :  $4p + 2e^- \rightarrow {}^4\text{He} + 2\nu_e + 27 \text{ MeV}$ . Il est ainsi le siège d'un cycle compliqué de réactions, dont certaines produisent des  $\nu_e$  (voir Figure 4). Les principaux sont les neutrinos dits primordiaux de faible énergie, encore dénommés neutrinos « pp » ( $\nu_e(\text{pp})$ ,  $E < 0,42 \text{ MeV}$ ), les neutrinos mono-énergétiques du béryllium ( $\nu_e(\text{Be})$ ,  $E = 0,8 \text{ MeV}$ ), et les neutrinos les plus énergétiques du bore ( $\nu_e(\text{B})$ ,  $E < 14 \text{ MeV}$ ). Depuis les travaux pionniers de John Bahcall, on sait prédire la distribution en énergie de ces neutrinos et leur flux attendu sur Terre : 66 milliards de neutrinos par centimètre carré et par seconde !

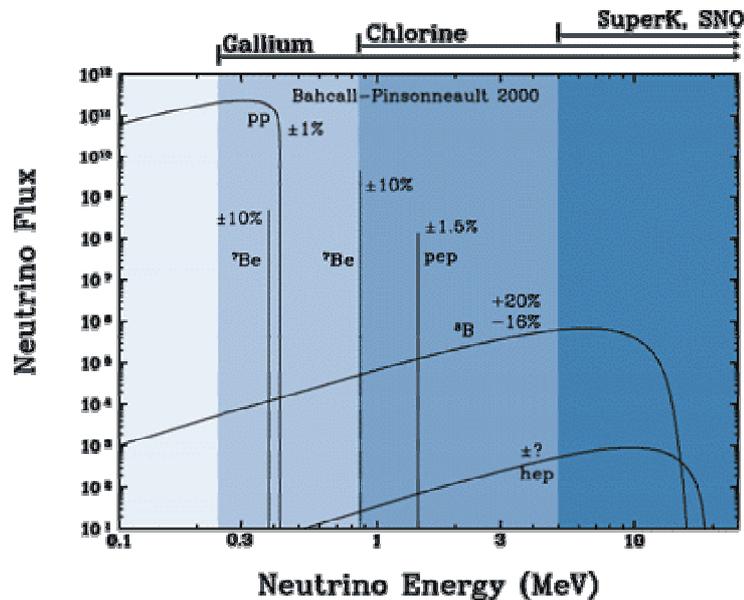


Figure 4: Distribution en énergie (abscisse) et en flux (ordonnée) des neutrinos en provenance du Soleil. Deux type de spectres sont représentés : les spectres continus (les neutrinos « pp », et du Bore « B » par exemple) qui correspondent à des processus à réactions où l'énergie disponible est partagée entre trois corps, et les spectres mono-énergétiques (les neutrinos du béryllium « Be » par exemple), où l'énergie disponible est seulement partagées entre le noyau émetteur et le neutrino. En haut on a représenté la gamme d'énergie sondée par les expériences GALLEX/GNO, Chlorine (R. Davis) et Super-Kamiokande et SNO. @ John Bahcall.

Compte tenu de la furtivité des neutrinos, les détecteurs de neutrinos solaires ont certaines caractéristiques communes : il doivent comporter un réservoir de détection très volumineux, être enfouis le plus profondément sous terre afin de se protéger des rayons cosmiques qui perturbent la mesure, et être composés de matériaux, dits « ultra purs », soigneusement sélectionnés pour contenir des teneurs très faibles en éléments radioactifs tels que l'uranium, le thorium, le potassium, qui sont aussi sources de bruit de fond.

En 1968 Ray Davis obtint le feu vert pour réaliser la première expérience de recherche des neutrinos du Soleil. A l'époque l'objectif était de démontrer que le Soleil fonctionne « au nucléaire » plutôt que de parfaire nos connaissances sur les neutrinos. Avec ses collaborateurs il installa un détecteur de 615 tonnes de perchloréthylène<sup>9</sup> dans la mine de Homestake (Dakota du Sud). Davis utilisa le principe de détection « radiochimique » ; il exploita la réaction  $\nu_e + {}^{37}\text{Cl} \rightarrow {}^{37}\text{Ar} + e^-$ , essentiellement sensible aux  $\nu_e(\text{B})$ . Le détecteur était exposé aux neutrinos solaires par cycle de deux mois, puis un processus physico-chimique permettait d'extraire et d'isoler les quelques atomes d'argon produits (voir Figure 5). Enfin, les atomes d'argon 37 -qui sont radioactifs<sup>10</sup>- étaient comptabilisés : 1 tous les deux jours ! Cette expérience qui a fonctionné entre 1968 et 2000 a, dès la première année, mis en évidence un déficit des neutrinos solaires. Davis observait seulement entre 30% et 50% du flux prédit par les modèles. C'est ce que l'on a appelé pendant plus de trente ans *le problème des neutrinos solaires*. Ray Davis a reçu le prix Nobel de physique en 2002 pour cette expérience pionnière du domaine.

Une vingtaine d'années plus tard, deux autres expériences radiochimiques, SAGE (Russie) et Gallex/GNO (Italie) se lancèrent cette fois en quête des neutrinos produits lors de la réaction de fusion primordiale ( $\nu_e(\text{pp})$ ). Les physiciens exploitèrent la réaction  $\nu_e + {}^{71}\text{Ga} \rightarrow {}^{71}\text{Ge} + e^-$ , qui peut être induite par les  $\nu_e(\text{pp})$ <sup>11</sup>. Gallex/GNO utilisa une solution de 30 tonnes de Gallium sous forme de  $\text{GaCl}_3$  (voir Figure 5). A l'issue d'une période d'exposition, les atomes de  ${}^{71}\text{Ge}$  étaient extraits et comptés (par le biais de leurs désintégrations radioactives). Le déficit fut confirmé de façon indéniable car ces expériences furent étalonnées à l'aide d'une source artificielle de neutrinos placée au cœur de la solution. Environ quarante pourcent des neutrinos  $\nu_e(\text{pp})$  manquaient à l'appel. Cependant les soixante pourcent restant étaient bel et bien détectés et ces expériences apportèrent donc la preuve irréfutable que notre Soleil puise son énergie de la fusion de deux protons.

Au milieu des années 1980, l'expérience Kamiokande débuta dans la mine de Kamioka (Alpes japonaises). Ce détecteur de 2140 tonnes d'eau ultra-pure permit la détection des neutrinos solaires les plus énergétiques ( $\nu_e(\text{B})$ ) en exploitant la réaction de diffusion élastique des neutrinos sur les électrons orbitant dans molécules d'eau :  $\nu_e + e^- \rightarrow \nu_e + e^-$ . Cette diffusion est qualifiée « d'élastique » car on retrouve les mêmes particules avant et après l'interaction. Si l'électron est éjecté à une vitesse supérieure à la vitesse de la lumière dans l'eau (220 000 km/s), une lueur bleutée est émise le long de la course de l'électron. C'est l'effet Tcherenkov. Cette lumière intercepte la surface du détecteur cylindrique tapissée de TPM selon des anneaux. Ce sont ces anneaux qui sont recherchés dans l'analyse des données. Cette technique permet de détecter les neutrinos « en temps réel », même si l'on est incapable de discerner une véritable interaction de neutrino d'un bruit de fond pour un événement donné. Depuis 1996, ce détecteur a été remplacé par l'expérience Super-Kamiokande (SK) fonctionnant exactement sur le même principe, mais possédant un volume cible de 50 000 tonnes d'eau ultra-pure, observé par plus de 11 000 TPM (voir Figure 5). Avec plus de 20 000  $\nu_e$  collectés pour 1500 jours d'observation, SK a certifié de façon éclatante la carence de  $\nu_e$  solaires (mais seuls les  $\nu_e$  du bore étaient détectés ...). De plus, la direction de l'électron émis ayant une forte corrélation avec celle du neutrino incident, SK démontra que les  $\nu_e$  proviennent bien du Soleil ! Une image du Soleil en neutrino avec un temps de pose de 1500 jours a même été publiée (voir Figure 9).

<sup>9</sup>  $\text{C}_2\text{Cl}_4$ , un détergent utilisé pour nettoyer les vêtements.

<sup>10</sup> Ils se désexcitent par capture d'un électron du cortège électronique avec émission de rayons X ou d'électrons. La période de demi-vie radioactive est de 35 jours.

<sup>11</sup> Cette réaction n'est possible que si l'énergie des neutrinos incidents est supérieure à 0,233 MeV. Le spectre des  $\nu_e(\text{pp})$  s'étend de 0 à 0,42 MeV. Une partie d'entre eux peut donc induire cette réaction.

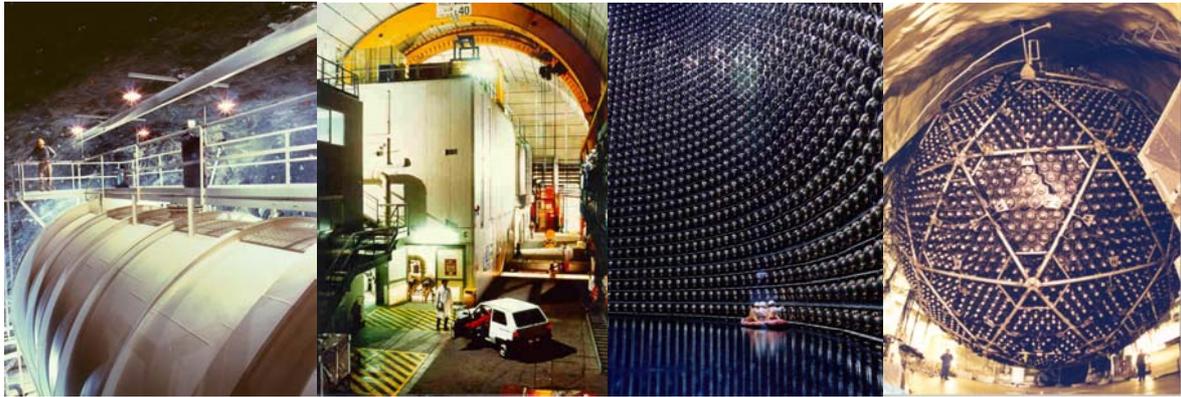


Figure 5: Photographies des expériences Chlorine de R. Davis (@ The Chlorine Experiment), Gallex/GNO (@ INFN - Gran Sasso National Laboratories), Super-Kamiokande (Kamioka Observatory, ICRR, The University of Tokyo), et SNO (@ Lawrence Berkeley National Laboratory).

En 1999, l'expérience « temps réel » SNO, située à 2 kilomètres sous terre, dans une mine de nickel du Canada, est entrée en action. SNO ressemble dans son concept à SK. Cependant, une astuce d'une importance capitale a été mise en oeuvre : l'eau ordinaire ( $^1_1\text{H}_2\text{O}$ ) est remplacée par de l'eau lourde ( $^2_1\text{D}_2\text{O}$ , ou  $^2_1\text{D}_2$  est le deutérium composé d'un proton p et d'un neutron n). Le détecteur contient 1000 tonnes de  $\text{D}_2\text{O}$  contenues dans une immense sphère d'acrylique de 12 mètres de diamètre. Cette sphère est elle-même englobée dans un réservoir de 30 mètres de haut (voir Figure 5). La technique de détection Tcherenkov est utilisée. La lumière émise à l'issue des interactions de neutrinos est collectée par 9500 TPM. L'expérience est sensible à trois réactions distinctes (voir Figure 6): la réaction de diffusion élastique comme dans le cas de SK, sensible essentiellement aux  $\nu_e$  ; la réaction « courant chargé »  $\nu_e + \text{D} \rightarrow e^- + \text{p} + \text{p}$ , sensible uniquement aux  $\nu_e$  ; et la réaction « courant neutre »  $\nu_x + \text{D} \rightarrow \nu_x + \text{p} + \text{n}$ , sensible de manière identique aux trois saveurs de neutrinos. Dans les deux premiers cas, c'est l'électron de l'état final qui est observé, alors que dans le troisième cas c'est le neutron. En juin 2001, SNO a confirmé le déficit de  $\nu_e$ . Mais bien plus important, SNO a détecté de façon incontestable la présence des deux autres saveurs de neutrinos,  $\nu_\mu$  et  $\nu_\tau$ , dans le flux que nous recevons du Soleil. L'interprétation de ce résultat est sans équivoque : au cours de leur voyage vers la Terre, une partie des  $\nu_e$  se transforme en  $\nu_\mu$  et  $\nu_\tau$ . C'est ce que l'on appelle la conversion de saveur. Le mécanisme le plus en vogue pour expliquer cet effet est l'oscillation des neutrinos. Nous y reviendrons bientôt.

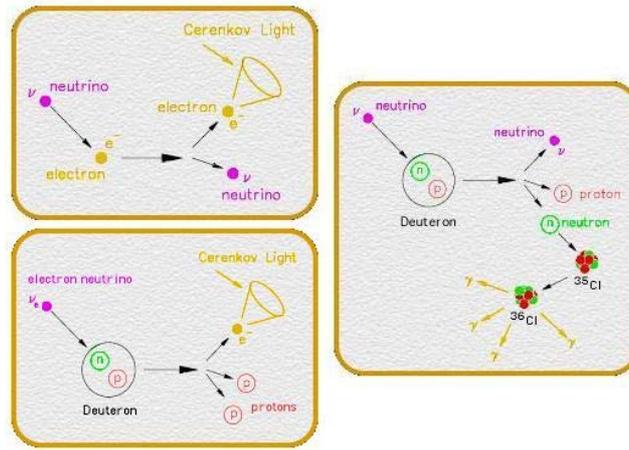


Figure 6: Les trois réactions de détection des neutrinos solaires dans l'expérience SNO : la diffusion élastique (en haut à gauche), la dissociation du deutérium (deutéron) par courant chargé (en bas à gauche), et la dissociation du deutérium par courant neutre (à droite). @ SNO Collaboration.

## Les neutrinos atmosphériques

La Terre est perpétuellement bombardée par des rayons cosmiques qui ne sont autres que des protons ou des noyaux légers pour l'essentiel. Ces noyaux interagissent dans les hautes couches de l'atmosphère en produisant des pions ( $\pi$ ) et des kaons<sup>12</sup> (K), qui se désintègrent en muons et en neutrinos (voir Figure 7). On nomme ces derniers « neutrinos atmosphériques ». Le calcul de leur flux théorique est compliqué et nécessite des simulations informatiques sophistiquées. Pour la polarité positive ( $\pi^+$ ,  $K^+$ ), la séquence de réactions s'écrit :

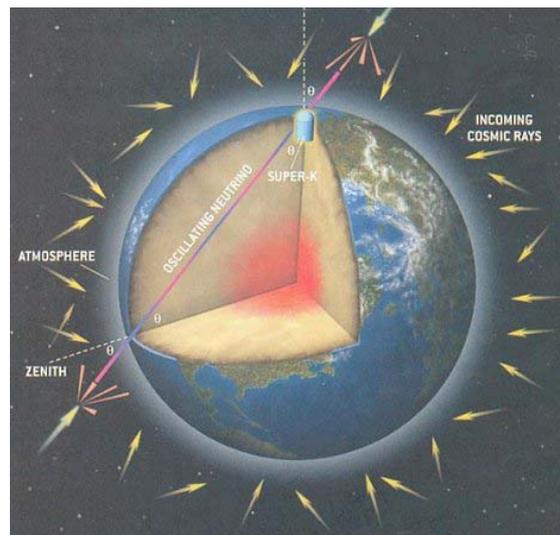
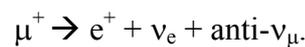
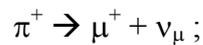
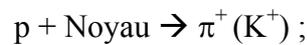


Figure 7: Schéma représentant la production des neutrinos atmosphériques (électroniques et muoniques) par interaction des rayons cosmiques dans la haute atmosphère (au dessus du détecteur et aux antipodes), et leur détection dans le détecteur souterrain Super-Kamiokande (Japon). @universe-review.ca/.

<sup>12</sup> Un kaon est une particule composée d'un quark et d'un anti-quark. Il appartient à la catégorie des mésons, tout comme le pion, dont la masse est environ quatre fois plus faible.

Pour la polarité négative ( $\pi^-$ ,  $K^-$ ), il faut simplement inverser les charges électriques et remplacer chaque lepton par son antiparticule. Un simple comptage des neutrinos dans l'état final montre que deux fois plus de neutrinos muoniques que de neutrinos électroniques sont produits. La grandeur pertinente à mesurer est le rapport entre les nombres de neutrinos  $\mu$  et  $e$  ( $R=v_\mu/v_e$ ). Ce rapport est attendu à 2 neutrinos  $v_\mu$  pour 1 neutrinos  $v_e$ .

Au milieu des années 80, des expériences furent construites pour rechercher l'éventuelle désintégration du proton. Ces recherches étaient motivées par des théories d'unification des interactions électromagnétique, faible, et forte (appelées théories de grande unification). Cette désintégration n'a jamais été décelée mais, au cours des investigations, un bruit de fond parasite a été remarqué et s'est révélé être extrêmement intéressant : le signal des neutrinos atmosphériques.

Dès les années 1990, les expériences Kamiokande (Japon) et IMB/Soudan (Etats-Unis) observaient un rapport  $R$  inférieur à 2, mais la quantité de neutrinos détectés était insuffisante pour convaincre la communauté scientifique car d'autres expériences contredisaient ce résultat. Le coup de grâce fut donné en 1998 à la conférence de Takayama au Japon. L'expérience Super-Kamiokande (SK) confirma le déficit avec une statistique suffisante pour persuader les plus sceptiques.

En fait, les neutrinos atmosphériques sont produits dans l'atmosphère au-dessus du détecteur, à une distance d'environ 10 kilomètres, mais si l'on prend le cas extrême, ils sont aussi produits dans l'atmosphère aux antipodes, à une distance de 12 750 kilomètres. Rappelons que la Terre est « quasi » transparente aux neutrinos aux énergies considérées. Or, SK a observé un rapport  $R_d=2$  pour les neutrinos « descendants » (provenant du dessus du détecteur), mais un rapport  $R_m\cong 1$  pour les neutrinos « montants » (provenant des antipodes).

Ces observations s'expliquent par la conversion de saveur des neutrinos, et plus précisément par le mécanisme d'oscillation des neutrinos. Les neutrinos muoniques descendants n'ont pas le temps de se transformer dans une autre saveur avant d'atteindre le détecteur, on a donc  $R_d=2$ , alors que les neutrinos muoniques ascendants, qui parcourent jusqu'à mille fois plus de chemin, se convertissent vraisemblablement en neutrinos tauiques. Ces derniers ne sont pas détectés dans SK, et l'on obtient donc  $R_m<2$ .

Nous allons voir maintenant que la découverte de la conversion de saveur pour les neutrinos atmosphériques et les neutrinos solaires est d'une importance capitale car elle implique que les neutrinos ont une masse non nulle.

## Conversion de saveur et oscillations de neutrinos

La conversion de saveur est la métamorphose d'un neutrino d'une famille donnée en un neutrino d'une autre famille au cours de sa propagation, que l'on note par exemple  $v_e \rightarrow v_\mu$ . Cette transformation viole la conservation du nombre leptonique de saveur. Le mécanisme d'oscillation est la théorie la plus probante pour interpréter les résultats expérimentaux que j'ai présentés préalablement. L'oscillation est un phénomène d'interférence qui émerge naturellement de la mécanique quantique si l'on suppose que les états quantiques reconnus par l'interaction faible ( $v_e, v_\mu, v_\tau$ ) sont différents des états quantiques « de propagation » ( $v_1, v_2, v_3$ ). Ces derniers sont aussi les états « de masse » des neutrinos 1, 2, et 3 qui ont respectivement des masses  $m_1, m_2$ , et  $m_3$ . Aussi étrange que cela puisse paraître, les masses  $m(v_e), m(v_\mu), m(v_\tau)$  sont indéfinies. Si les masses sont nulles les états de saveur coïncident avec les états de propagation.

Imaginons qu'un neutrino soit produit dans l'état de saveur muonique  $v_\mu$ . Cet état est en fait la superposition cohérente des ondes de matière  $v_1$  et  $v_2$  :  $v_\mu = a v_1 + b v_2$  (en considérant uniquement les deux premières familles pour simplifier, ou  $a$  et  $b$  sont des constantes telles que

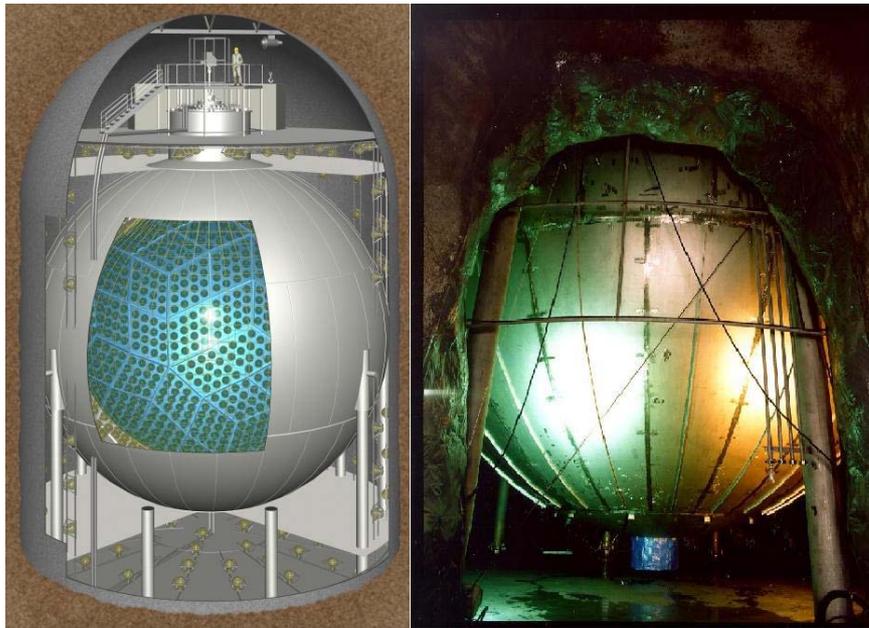
$a^2+b^2=1$ ). Lors de la propagation, l'amplitude des états  $\nu_1$  et  $\nu_2$  évolue périodiquement selon leurs énergies ; cette évolution est régie par l'équation de Schrödinger. Si les masses  $m_1$  et  $m_2$  sont différentes, les ondes 1 et 2 interfèrent au cours de la propagation, avec une différence de phase proportionnelle à  $(m_2^2-m_1^2)/E_\nu$ , si bien que la probabilité d'observer un neutrino muonique oscille en fonction de la distance à la source de production (et donc du temps). Un calcul simple montre que la probabilité qu'un  $\nu_\mu$  se transforme en  $\nu_e$  s'écrit alors  $P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) = 4a^2b^2 \sin^2(1,27(m_2^2-m_1^2)L/2E_\nu)$  (Eq. 1), où le produit  $4a^2b^2$  caractérise l'amplitude de l'oscillation (à déterminer expérimentalement);  $L$  est la distance parcourue (en mètres);  $E_\nu$  est l'énergie du neutrino (en MeV); et  $m_1$  et  $m_2$  les masses (en eV). Comme dans tout phénomène ondulatoire périodique, on y associe une longueur d'oscillation  $L_{osc}=2,5E_\nu/(m_2^2-m_1^2)$ . Cette longueur est d'autant plus grande que la différence entre les masses est faible. Après avoir parcouru exactement une longueur d'oscillation le neutrino retrouve sa saveur de production  $\nu_\mu$ . Le phénomène recommence alors à l'identique sur une deuxième période, et ainsi de suite. Ce résultat se généralise sans problème à plus de deux familles.

Fait essentiel, la probabilité d'oscillation dépend de la différence des carrés des masses des deux neutrinos. Si les masses sont nulles, il ne peut y avoir oscillation. A contrario, la mise en évidence expérimentale des oscillations par les expériences de neutrinos solaires et atmosphériques implique des neutrinos massifs ! Mais souvenons nous que le MSPP a été construit avec des neutrinos de masse nulle ... Il va donc falloir le faire évoluer. C'est un des résultats les plus importants de ces dernières années en physique des particules.

## Les confirmations

Les expériences de neutrinos solaires peuvent s'interpréter par une oscillation de  $\nu_e \rightarrow \nu_\mu$  telle que  $\Delta m_{sol}^2=m_2^2-m_1^2 \cong 0,0001 \text{ eV}^2$ . Si le mécanisme d'oscillation est à l'œuvre, la longueur d'oscillation associée à des neutrinos d'énergie de l'ordre du MeV est d'environ 100 kilomètres. En supposant que l'oscillation des anti-neutrinos est identique à celle des neutrinos<sup>13</sup>, on devrait observer un déficit d'anti-neutrinos dans un détecteur placé à une centaine de kilomètres d'une centrale nucléaire. Une telle expérience vient d'être menée à bien dans la mine de Kamioka (encore une fois !). L'expérience KamLAND détecte les anti- $\nu_e$  d'une dizaine de réacteurs nucléaires éloignés, en moyenne, de 200 kilomètres. Auparavant, toutes les expériences de neutrinos de réacteurs avaient été réalisées à une distance d'au plus un kilomètre des cœurs nucléaires. L'expérience KamLAND est donc constituée d'un volume cible de 1000 tonnes de liquide scintillant pour compenser la perte de flux due à l'éloignement (voir Figure 8). La réaction de détection est la désintégration  $\beta$  inverse, tout comme dans l'expérience de Savannah River en 1956. En décembre 2002, KamLAND a confirmé l'ensemble des résultats des expériences de neutrinos solaires après l'observation d'un déficit de la moitié des anti-neutrinos attendus. C'est le résultat le plus important communiqué à la grande conférence biannuelle des neutrinos qui s'est tenue à Paris en juin 2004.

<sup>13</sup> On suppose ici les lois de la physique sont invariantes par changement entre particule et antiparticule et renversement du temps (théorème CPT).



**Figure 8: Schéma du détecteur KamLAND (à gauche) et photographie de la structure de support des TPM vue de l'extérieur lors de l'installation (à droite). @ Collaboration KamLAND.**

Les expériences de neutrinos atmosphériques tendent à indiquer qu'il y a une oscillation de  $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$  telle que  $\Delta m^2_{\text{atm}} = m_3^2 - m_2^2 \cong 0,001 \text{ eV}^2$ .

La confirmation de la transition  $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$  (et non  $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ ) a été apportée par l'expérience de neutrinos de réacteur Chooz en 1999. Située à 1 kilomètre des cœurs de la centrale nucléaires de Chooz (Ardennes), elle était donc sensible à  $\Delta m^2_{\text{atm}} \cong 0,001 \text{ eV}^2$ . Dans le cas d'une transition  $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$  l'expérience Chooz, composée de 5 tonnes de liquide scintillant, aurait dû détecter un déficit d'anti- $\nu_e$ , ce qui ne fut pas le cas.

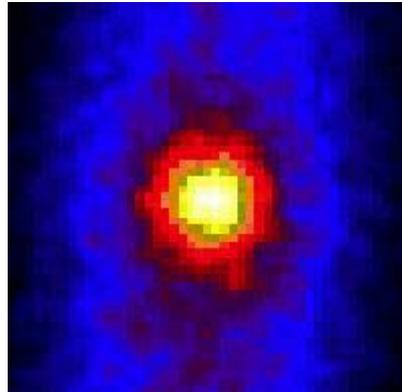
Si l'on considère des neutrinos muoniques de quelques centaines de MeV produits par un accélérateur de protons, la longueur d'oscillation correspondante est de quelques centaines de kilomètres. L'accélérateur de protons de 12 GeV de KEK a été mis à profit pour envoyer un faisceau de neutrinos muoniques dans le détecteur Super-Kamiokande éloigné de 250 kilomètres. Là encore, un déficit de neutrino muonique conforme à la prédiction de la théorie des oscillations de neutrinos est observé. D'autres expériences sont en cours de construction aux États-Unis et en Europe pour mieux cerner cette oscillation. Il y a notamment les expériences ICARUS et OPERA, en cours d'installation dans le laboratoire sous terrain du Gran Sasso (Italie), qui vont chercher à identifier les traces des neutrinos tauiques apparaissant dans un faisceau de neutrinos muoniques fabriqué au CERN, à 730 kilomètres des détecteurs ! Petite précision de rigueur, les faisceaux de neutrinos sont totalement inoffensif ...

## **L'astronomie et la cosmologie par les neutrinos**

Le 23 février 1987, un nouvel éclat lumineux vint ponctuer le ciel de l'hémisphère sud. L'étoile Sanduleak-69 202, située dans le Grand Nuage de Magellan<sup>14</sup>, venait de s'effondrer sur elle-même, un phénomène explosif appelé Supernova (1987a). On a l'habitude de dire que la luminosité d'une supernova est aussi importante que celle de la galaxie hôte. Ceci pourrait cacher le fait que 99% de l'énergie dégagée lors de l'effondrement est rayonnée sous la forme de neutrinos (contre 0,01% pour les photons), en quelques secondes. Les neutrinos sont produits car la densité est telle que les protons et les électrons se combinent pour former des neutrons et des neutrinos de quelques dizaines de MeV:  $p + e^- \rightarrow n + \nu_e$ . Sur les  $10^{48} \text{ }^{754} \text{ }^{758}$  neutrinos produits (tbc) une vingtaine

<sup>14</sup> Le Grand Nuage de Magellan une galaxie très proche de la notre, située à 160,000 années lumières.

d'interactions de neutrinos électroniques ont été découvertes en coïncidence avec la supernova 1987a dans les détecteurs Kamiokande et IMB. Cet événement, qui marque la naissance de l'astronomie neutrino, a permis à Masatoshi Koshiba, l'instigateur de l'expérience Kamiokande, d'obtenir le prix Nobel de physique en 2002 (en fait Davis et Koshiba se sont partagé cette récompense).

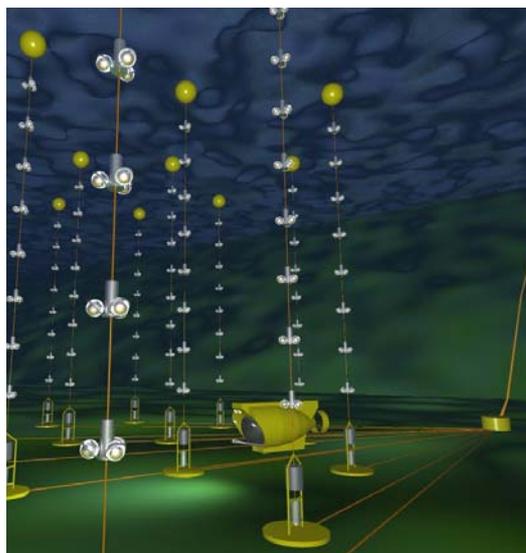


**Figure 9: Première image du Soleil observé par l'intermédiaire des neutrinos (le temps de pose est de 1500 jours environ, mais la résolution est évidemment bien inférieure à ce que l'on obtient en optique à cause de la difficulté d'obtenir précisément la direction du neutrino incident). @ Institute for Cosmic Ray Research, Tokyo.**

A l'heure actuelle, l'essentiel de nos connaissances de l'Univers provient d'observations véhiculées par les ondes électromagnétiques. En effet, les photons sont largement produits dans les phénomènes cosmiques, ils sont faciles à détecter, et leur neutralité garantit une bonne transmission de l'information (pas de déflexion par les champs magnétiques). Cependant, ces particules médiatrices des forces électromagnétiques interagissent à foison avec la matière. Les photons ne peuvent donc s'échapper des régions les plus denses où siègent des phénomènes astrophysiques violents que l'on souhaiterait mieux comprendre : systèmes binaires contenant un trou noir, supernovae, noyaux actifs de galaxies (AGN), etc. Théoriquement ces sources sont susceptibles de produire des neutrinos extrêmement énergétiques (de l'ordre du  $\text{TeV}=1000 \text{ GeV}$ ). Le neutrino semble donc être le candidat idéal pour de telles observations : il est neutre, stable, et interagit très faiblement avec la matière. Maintenant que nous connaissons son aptitude à osciller d'une saveur à une autre et les règles du jeu, il peut être utilisé à son tour comme sonde du Cosmos : c'est l'astronomie neutrino. Le seul obstacle restant est technologique car il faut construire des télescopes à neutrinos.

Contrairement aux expériences de neutrinos exposées auparavant, les flux que l'on cherche à détecter sont très faibles en raison de l'éloignement des sources. Cet effet est partiellement compensé par la haute énergie des neutrinos recherchés (la section efficace augmente avec l'énergie), mais le volume requis pour le détecteur est tout de même gigantesque. Malgré cela vous allez voir que les physiciens ne reculent devant rien. Le globe terrestre peut en effet être utilisé comme cible, et l'eau ou la glace comme milieu de détection des neutrinos muoniques. Dans ce cas, un  $\nu_\mu$  provenant du Cosmos traverse la Terre de part en part, et peut interagir juste avant de ressortir de l'autre côté pour créer un muon. La lumière Tcherenkov de ce muon (un muon montant, pour un observateur debout à coté du détecteur) est détectable si l'on instrumente une surface d'un kilomètre carré au fond des océans ou sous une couche de glace des régions polaires, toujours à quelques kilomètres de profondeur pour se protéger des muons cosmiques parasites.

L'expérience ANTARES est en cours de déploiement au fond de la mer Méditerranée, à 40 kilomètres de Toulon et 2500 mètres de profondeur. Le détecteur sera constitué de 1000 TPM répartis sur un réseau de lignes de détection de 350 mètres de haut ancrées au fond de la mer, et espacées de 70 mètres (voir Figure 10). Le détecteur AMANDA, fonctionnant sur le même principe mais ayant un volume sensible d'un kilomètre cube, est aussi en cours d'installation en Antarctique (évidemment, la glace remplace l'eau). La découverte très attendue des premiers signaux ouvrira assurément une nouvelle fenêtre d'observation de l'univers.



**Figure 10: Vue d'artiste du détecteur ANTARES, accompagné du sous-marin Le Nautilus déployé pour l'installation. Les lignes verticales de 350 mètres de haut sont ancrées au fond de la mer et maintiennent les TPM. On aperçoit les câbles reliant le détecteur à la côte. @ Collaboration ANTARES.**

Le modèle du Big-bang, qui décrit l'évolution de l'Univers dans son ensemble, prédit l'existence du rayonnement fossile de photons à 3 Kelvin (-270 degrés Celsius), détecté en 1965. D'une manière analogue le modèle prévoit l'existence d'un rayonnement fossile de neutrinos à 1,9 Kelvin. Cela correspond à une énergie des neutrinos de l'ordre du milli électron volt (meV) qui rend leur détection irréalisable avec les moyens technologiques actuels. Théoriquement, chaque centimètre cube d'Univers contient 100 neutrinos et antineutrinos de chaque saveur<sup>15</sup>. Leur nombre est si important qu'on a longtemps pensé qu'ils pouvaient contribuer significativement à la matière noire de l'Univers, encore vivement recherchée. Nous savons maintenant qu'il n'en est rien. Un ensemble d'expériences de physique des particules et de cosmologie ont permis de mettre une limite supérieure à la masse du neutrino le plus lourd, à environ 1 eV. En conséquence la contribution des neutrinos au bilan massique de l'univers ne peut excéder quelques pourcents, ce qui est tout de même équivalent à la masse de toutes les étoiles !

## Une première retombée technologique ?

Il ne fait aucun doute que la recherche fondamentale est en soi-même extrêmement utile pour la société. Néanmoins, on est en droit de se demander : les neutrinos, à quoi ça sert ?

Certains physiciens des neutrinos commencent à entrevoir de possibles applications exploitant les propriétés passe muraille des neutrinos. Les anti-neutrinos émis par les réacteurs nucléaires peuvent en effet nous renseigner sur l'état des réactions nucléaires au sein des cœurs en fission, et sur la composition du combustible au cours du temps (le plutonium si convoité pour la fabrication de bombes). L'agence internationale pour l'énergie atomique (AIEA) a récemment lancé une étude pour déterminer dans quelle mesure un modeste détecteur de neutrinos, placé à côté des centrales nucléaires, pourrait contribuer à sa mission de contrôle de la non prolifération des armes nucléaires. Le projet d'expérience pilote Double-Chooz (sur le site de la centrale nucléaire de Chooz dans les Ardennes), est actuellement à l'étude. Cette expérience a pour but de parfaire nos connaissances sur le mélange des saveurs de neutrinos, et en parallèle de répondre aux questions de l'AIEA.

---

<sup>15</sup> Ceci est à comparer avec la densité de matière connue : 1 proton par mètre cube !

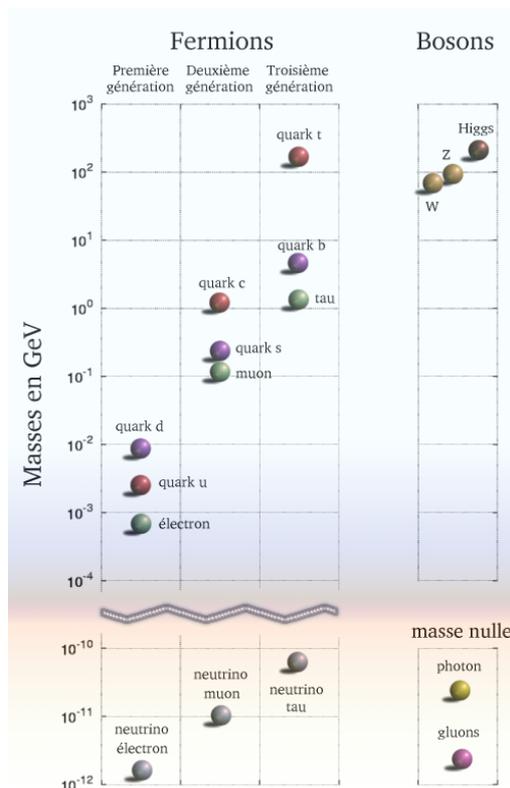


Figure 11: Tableau résumant les connaissances sur la masse des particules élémentaires. Il est remarquable que l'échelle des masses s'étale sur une quinzaine d'ordres de grandeurs. Ceci reste à expliquer. @G. Mention.

## Un domaine en pleine effervescence

La mise en évidence de la masse des neutrinos est une découverte fondamentale qui induit beaucoup de questions, qui je l'espère seront résolues par la prochaine génération d'expériences.

Premièrement, il reste à confirmer par de nouvelles mesures que le mécanisme des oscillations est bien à l'origine des phénomènes de conversion de saveur observés. Les mesures de précision nécessaires seront essentiellement effectuées par des expériences auprès d'accélérateurs et de réacteurs nucléaires.

Le secteur des leptons du MSPP doit être reformulé pour prendre en compte les neutrinos massifs. Plusieurs possibilités s'offrent aux théoriciens, mais seules les expériences futures permettront d'arbitrer. Nous devons notamment déterminer si le neutrino est sa propre antiparticule (neutrino de Majorana) ou si le neutrino et l'antineutrino sont des corpuscules bien distincts (neutrino de Dirac).

Il faut aussi mesurer les masses absolues des trois états de propagation des neutrinos car les expériences d'oscillations ne mesurent que les différences des carrés des masses. En fait il suffit de déterminer une seule de ces masses, et les deux autres seront immédiatement déduites des résultats des expériences d'oscillations par les relations :  $m_2^2 = m_1^2 + \Delta m_{21}^2$  et  $m_3^2 = m_1^2 + \Delta m_{21}^2 + \Delta m_{32}^2$ . Au jour d'aujourd'hui la combinaison de toutes les expériences permet de contraindre la masse du neutrino le plus massif :  $0.03 < m_3 < 0.3$  eV. En laboratoires, deux types d'expériences s'offrent aux physiciens pour mesurer la masse de façon certaine.

La méthode directe qui consiste à mesurer avec précision le spectre d'énergie de l'électron émis lors de la désintégration  $\beta$  du tritium. Une légère distorsion proportionnelle à la masse du neutrino doit être imprimée sur le spectre. En effet, un neutrino massif emporte plus d'énergie

qu'un neutrino de masse nulle, ce qui décale l'extrémité du spectre de l'électron vers les énergies plus basses. En l'absence de distorsion cette méthode permet juste de contraindre la masse à moins de 2 eV. Les recherches continuent dans cette voie dans le but m'atteindre un sensibilité dix fois meilleure.

La deuxième approche indirecte qui semble plus prometteuse est l'étude de double désintégration  $\beta$ . Il s'agit d'un processus où un noyau (le  $^{76}\text{Ge}$  par exemple) ne peut pas regagner un état plus stable par la désintégration  $\beta$  classique. Dans ce cas, le noyau peut se désintégrer par la transformation simultanée de deux neutrons en deux protons, en émettant deux électrons et deux anti-neutrinos. Ce processus très rare est noté  $\beta\beta 2\nu$  et a déjà été observé pour différents noyaux. Cependant, si le neutrino est massif et s'il est sa propre antiparticule, un autre processus encore plus rare devrait se produire : la double désintégration  $\beta$  sans émission de neutrinos, notée  $\beta\beta 0\nu$ . La probabilité de cette réaction, qui n'a encore jamais été observée, permettrait de remonter à l'échelle de masse absolue des neutrinos. De nombreuses expériences réparties sur l'ensemble de la planète sont en quête de cette désintégration  $\beta\beta 0\nu$ , dont notamment l'expérience NEMO située dans le laboratoire souterrain de Modane, à la frontière franco-italienne. La sensibilité de ces expériences avoisine le dixième d'électron volt.

Enfin, le comportement des neutrinos est peut-être différent de celui des antineutrinos. C'est ce que l'on appelle la violation de la symétrie CP. Certes, cette différence est probablement faible, mais elle pourrait expliquer pourquoi la matière domine sur l'antimatière dans l'Univers. Cette question essentielle pourrait être étudiée expérimentalement dans les dix prochaines années.

Les neutrinos n'ont donc potentiellement pas fini de nous surprendre !

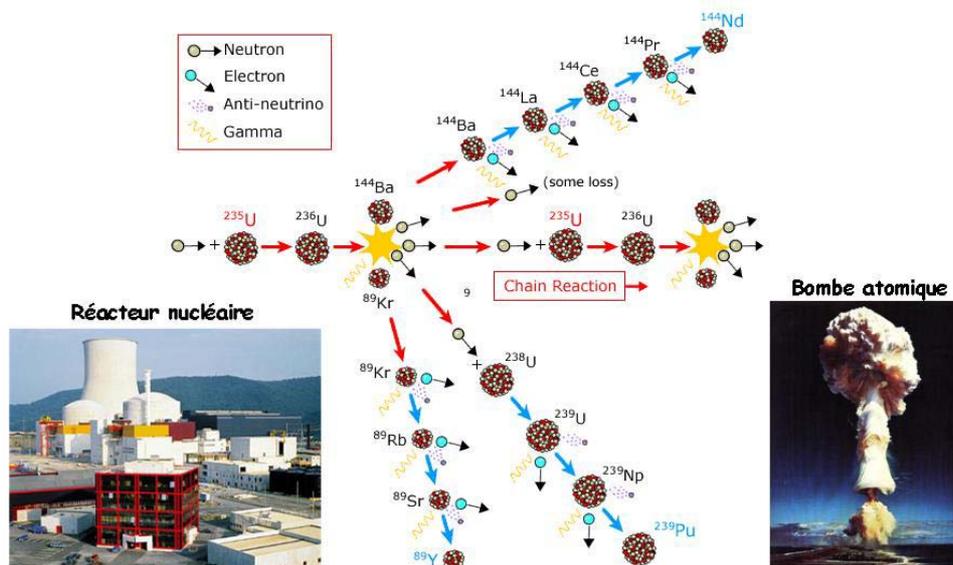


Figure 12: Réactions de fissions en chaîne. Ces dernières sont contrôlées dans le Coeur des centrales nucléaires, et explosive dans le cas de bombes atomique de type A. Les neutrinos sont émis lors des désintégrations  $\beta$  des produits de réaction.