

LES NEUTRINOS SOLAIRES

L'assemblée générale du CLEA, le 22 janvier 1983, a bénéficié, après ses débats animés sur les problèmes de l'enseignement de l'astronomie, d'une belle conférence de Evry Schatzman. Les Cahiers Clairaut sont heureux d'en publier le texte intégral, transcrit par G. Walusinski de l'enregistrement pris en séance et revu par l'Auteur. Ce texte sera publié en deux parties, dans ce numéro et dans le numéro suivant.

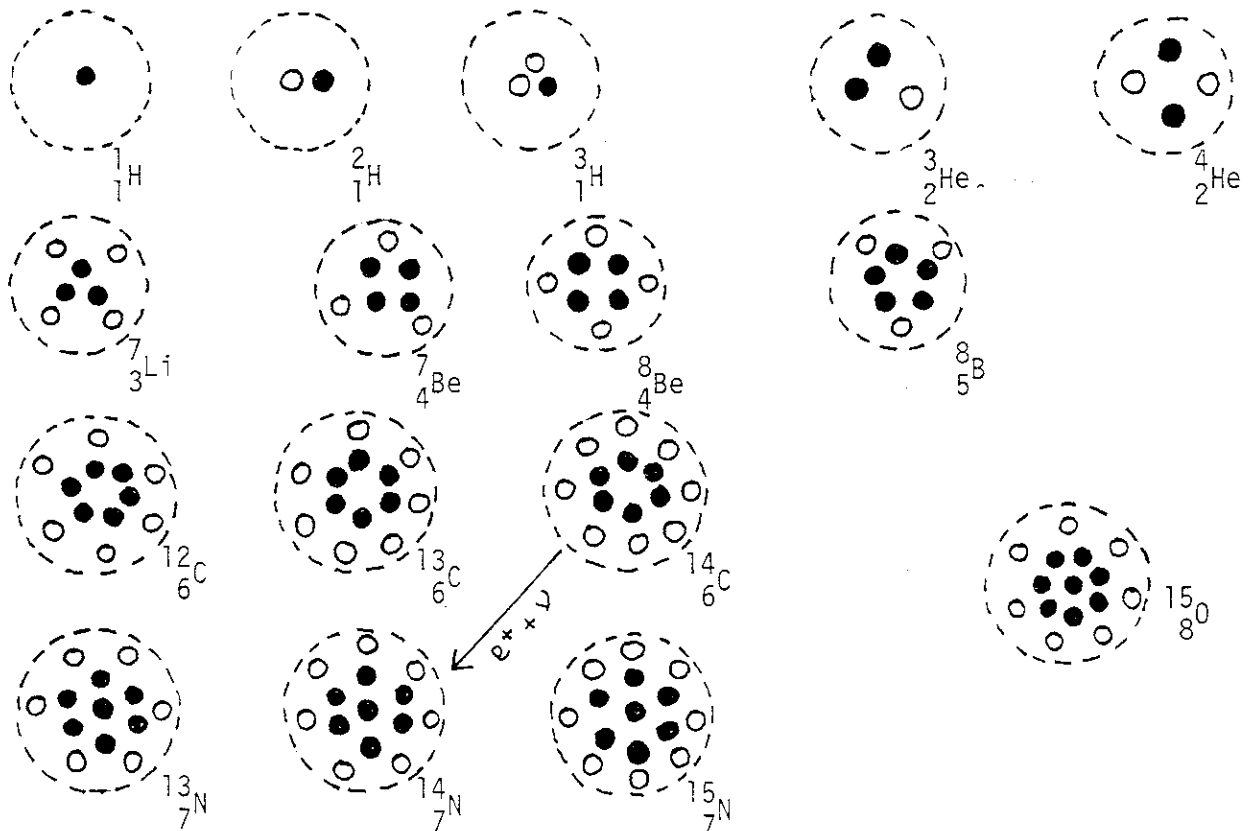
Pourquoi avoir choisi ce sujet? D'abord parce que je m'y intéresse et, plus encore, parce que, comme vous allez le voir il réunit des aspects variés de la physique: problèmes de physique des particules, celui des neutrinos en particulier, problème du Soleil dans son ensemble et enfin des expériences qui ont été réalisées au cours des vingt ou trente dernières années et qui sont remarquables à la fois par l'importance des dispositifs adoptés et par la finesse des résultats obtenus.

L'INVENTION DES NEUTRINOS.

Pour commencer, dressons la scène. Voici un schéma qui montre la constitution d'un certain nombre de noyaux atomiques. Les neutrons sont représentés par des ronds clairs, les protons par des ronds noirs:

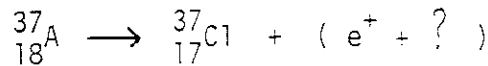
- trois variétés d'hydrogène, le proton ${}^1_1\text{H}$, le deutéron ${}^2_1\text{H}$ et le noyau de tritium ${}^3_1\text{H}$
- deux variétés d'hélium, l'hélium 4 avec deux protons et deux neutrons ${}^4_2\text{He}$, et l'hélium 3 à deux protons et un neutron ${}^3_2\text{He}$

Et ainsi de suite; j'ai représenté en plus le noyau d'un atome radioactif, le carbone 14, à 8 neutrons et 6 protons ${}^{14}_6\text{C}$, qui se désintègre spontanément en azote 14, ${}^{14}_7\text{N}$, à 7 protons et 7 neutrons.



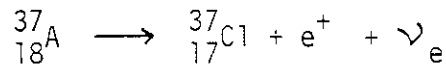
La découverte de la radioactivité, due aux travaux des Curie sur le radium, il y a à peu près trois quarts de siècle, a été appelée *radioactivité naturelle*. Terme impropre, car la radioactivité du carbone 14 est tout aussi "naturelle" que celle du radium, mais la durée de vie du carbone 14 étant assez courte, on ne le trouve pas à la pelle dans la nature et si on veut en avoir il faut le fabriquer. C'est en ce sens que l'on dit du carbone 14 qu'il présente une *radioactivité artificielle*. (En réalité, ce n'est pas sa radioactivité qui est artificielle mais le fait que l'existence de celle-ci est un artefact, le résultat d'une activité humaine; assertion qu'il faut aussitôt corriger puisqu'on trouve du carbone 14 dans le bois, ce qui sert à dater des spécimens archéologiques; il y a du carbone 14 qui est produit dans l'atmosphère terrestre et qui, par conséquent, joue un rôle dans le cycle des végétaux.)

D'où vient le problème de l'arrivée du neutrino sur la scène? L'existence de cette particule s'est révélée dans le bilan énergétique de certaines désintégrations. Ainsi l'argon 37 se désintègre en donnant du chlore et un électron positif:



Dans les expériences, réalisées autour des années 20, les mesures énergétiques faites par des méthodes purement calorimétriques ont révélé que l'énergie emportée par les électrons était généralement inférieure à celle que comportait la transition argon - chlore: l'énergie emportée par les électrons était moindre que l'énergie disponible. En mesurant l'énergie transportée par les électrons avec des systèmes apparentés à des spectrographes, on s'est aperçu que les électrons qui apparaissaient dans les transitions avaient toutes les énergies possibles entre zéro et l'énergie disponible soit 0,816 MeV.

Pour les physiciens, le principe de conservation de l'énergie est intangible. Pauli proposa pour cela d'introduire une nouvelle particule, *le neutrino* - dont le nom est dû à Fermi -, de telle façon que c'est l'ensemble énergie de l'électron positif augmentée de l'énergie du neutrino qui est égal à 0,816 MeV. La transition s'écrit alors:

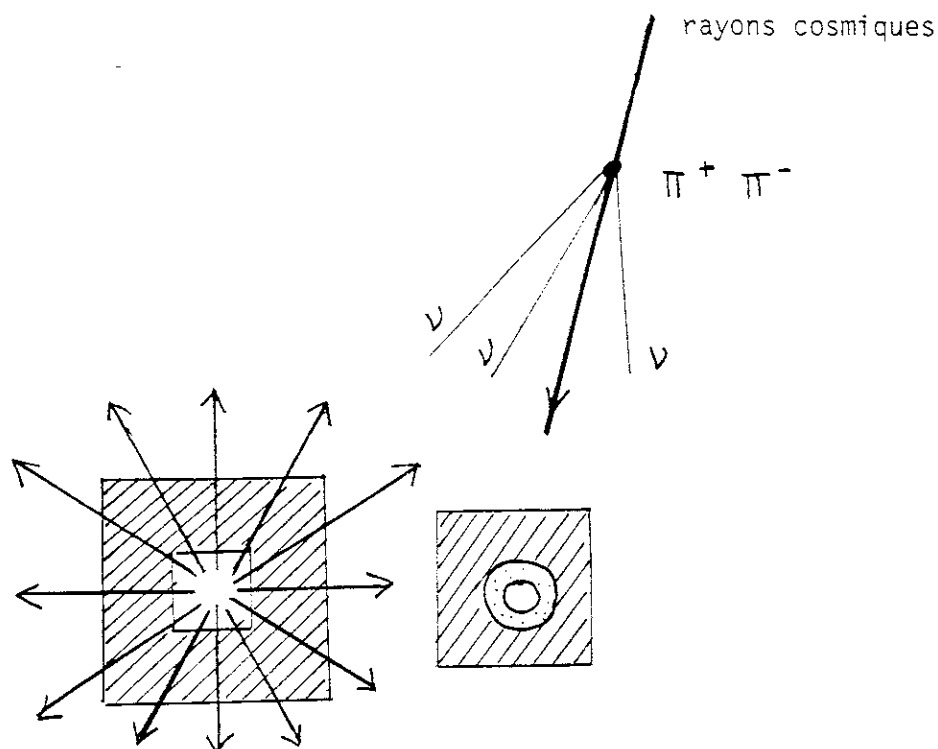


Le principe de conservation de l'énergie étant sauf, il fallait se demander quelle était cette particule nouvelle, quelles étaient ses propriétés. On reconnut rapidement que c'était une particule très difficile à attraper "au vol" pour l'étudier. En vous projetant un transparent vierge je peux vous dire "voici une image du neutrino". Pour être plus précis, disons que la section efficace du neutrino est de l'ordre de 10^{-44} cm², quantité trop petite pour qu'on se rende bien compte à quoi elle correspond. Ce qu'on peut traduire en donnant la probabilité pour qu'un neutrino interagisse avec la Terre soit $1/100 \times 10^6$ (pour cent milliards de neutrinos qui traverseraient la Terre, un seul serait arrêté) ou la probabilité pour qu'un neutrino interagisse avec le Soleil soit $1/10 \times 10^6$ (le Soleil est beaucoup plus gros que la Terre, mais il est moins dense).

COMMENT DETECTER LES NEUTRINOS ?

Voici une représentation très schématique de l'expérience de Cowan et Reines (1956).

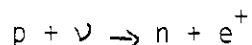
On se place au voisinage d'un réacteur à haut flux, un réacteur nucléaire dans lequel l'uranium est transformé en plutonium. Un grand flux de neutrinos est émis. On place un détecteur aussi près que possible pour se protéger de tous les parasites en particulier les rayons cosmiques, représentés sur le schéma par une gerbe dont la signification n'a pas actuellement d'importance. Ces rayons produiraient sur le détecteur les mêmes effets que les neutrinos que l'on veut étudier. Il y a bien dans ces rayons cosmiques quelques neutrinos mais très peu



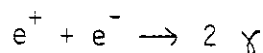
par rapport à ceux en provenance du réacteur.

Le blindage du récepteur est épais. Selon la petite histoire Cowan et Reines se seraient procuré un torpilleur à la casse et auraient ainsi utilisé pour faire écran de mille à mille deux cents tonnes de fer. Les neutrinos traversent le béton du réacteur puis le blindage du détecteur et atteignent enfin celui-ci, un scintillateur constitué de toluène.

Les neutrinos agissent sur les protons pour donner des neutrons et des électrons positifs:



Les électrons positifs avec les électrons négatifs du milieu s'annihilent pour donner deux photons de 0,511 MeV:



Quant aux neutrons, ils réagissent sur le cadmium qui est un système de dopage du scintillateur pour donner "autre chose" qui ne nous intéresse pas ici et un autre photon.

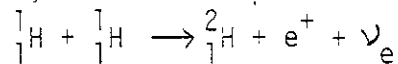
La mesure consiste donc à détecter d'une part les photons produits par la capture des neutrons et d'autre part ceux produits par l'annihilation des électrons positifs, eux-mêmes engendrés par la réaction du neutrino.

Dans l'expérience de Cowan et Reines, en 1956, on utilisait un scintillateur de 30 litres, - une prouesse pour l'époque alors qu'on utilise aujourd'hui des chambres de plusieurs mètres cubes -, et on détectait une dizaine de neutrinos par jour. Cela suffisait pour déterminer la section efficace du neutrino et prouver la réalité de son existence.

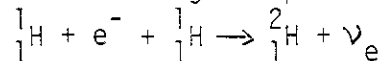
LES NEUTRINOS SOLAIRES

L'idée de détecter les neutrinos dans le rayonnement solaire est due à Fowler en 1957. Elle repose sur la mise en évidence des processus principaux de production d'énergie à l'intérieur du Soleil. Rappelons-les. La première partie en a été établie par Bethe en 1939, le reste par une série d'auteurs dont je ne donnerai pas la liste.

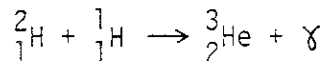
Au départ, la réaction proton-proton: deux protons réagissent en donnant un deutérium, un électron positif et un neutrino:



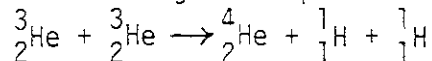
en même temps, mais dans une bien moindre proportion, 1/400 environ, deux protons réagissent avec un électron négatif pour donner un deutérium et un neutrino:



Le deutérium produit dans l'une ou l'autre de ces deux réactions réagit très vite avec un proton pour donner un hélium 3 et un photon:

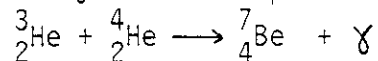


Alors plusieurs modes d'évolution s'ensuivent; dans le plus fréquent, 91% des cas, deux noyaux d'hélium 3 interagissent pour donner un hélium 4 et deux protons:

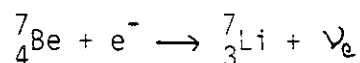


Si on comptabilise les protons qui interviennent, quatre pour former les deux deutérium (soit dans la réaction proton-proton (pp), soit dans la réaction proton-électron-proton (pep)), deux pour réagir sur les deux deutériums produits, en tout six protons; on en retrouve deux en fin de circuit; globalement, quatre protons ont produit un hélium 4.

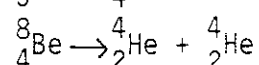
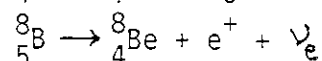
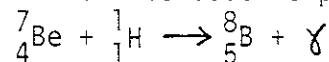
Il peut aussi arriver que les hélium 3 et 4 produits interagissent pour donner du béryllium et un photon:



Le béryllium obtenu réagit très vite. Ou bien avec un électron négatif il donne du lithium et un neutrino, le lithium produit réagissant sur un proton pour donner deux hélium 4:

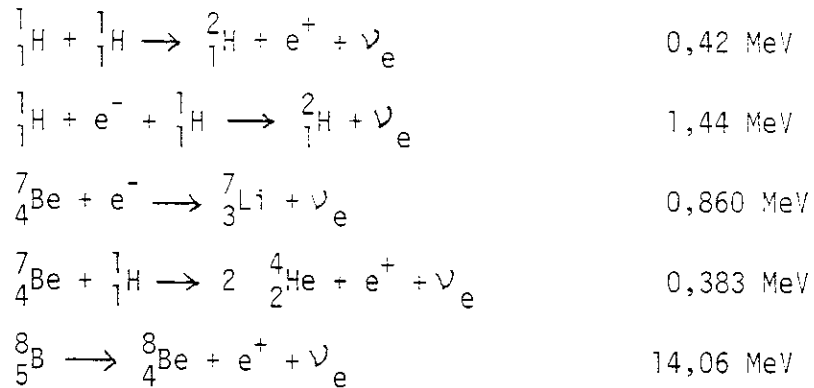


Ou bien (mais beaucoup plus rarement) le béryllium capte un proton pour donner du bore et un photon, le bore redonnant spontanément un béryllium, un électron positif et un neutrino, ce qui nous intéresse le plus pour la suite:



En résumé, à partir d'une réaction pp et grâce à la production successive d'hélium 3, puis d'hélium 4, puis de béryllium 7, puis de bore, puis de béryllium 8, on obtient enfin de l'hélium 4. Détecter les neutrinos produits au cours des diverses étapes a paru possible, en s'inspirant de l'expérience de Cowan et Reines, à condition de disposer d'un récepteur convenablement adapté puisqu'on connaissait l'énergie des neutrinos à chaque étape où il s'en produit.

Le tableau suivant indique l'énergie maximum des neutrinos dans chacune des réactions où il s'en produit.



On montre que la plupart des neutrinos produits sont de basse énergie (inférieure à 0,42 MeV) et proviennent de la réaction pp. Comme la luminosité solaire vient de la réaction pp, et que environ 60% des neutrinos produits viennent de cette réaction, peu importe en définitive où et comment elle se produit: la détection de ces neutrinos devrait donner un flux directement lié à la luminosité solaire.

Le problème était de trouver un détecteur aussi peu coûteux que possible car pour faire l'expérience il fallait voir grand. Il s'agissait de trouver un atome susceptible d'absorber les neutrinos, ou au moins certaines catégories d'entre eux, c'est-à-dire dont le seuil de capture soit aussi bas que possible.

Ainsi, avec le chlore 37 on ne peut recevoir que les neutrinos provenant de la capture des électrons sur le béryllium et seulement la plus grande partie des neutrinos qui proviennent de la désintégration du bore. Le récepteur chlore est imparfait mais le chlore n'est pas très coûteux; on l'a utilisé sous la forme plus maniable du tétrachlore éthylène qui est un solvant industriel assez courant.

La première expérience avec un réservoir d'un mètre cube de tétrachlore éthylène a été négative: on avait grandement surestimé le flux de neutrinos escompté. On opère suivant le schéma suivant; le détecteur est placé au fond d'une mine à environ 1 500 mètres de profondeur pour le mettre à l'abri des rayonnements parasites. Le détecteur qui fonctionne depuis plus de vingt ans comporte un réservoir de 600 mètres cubes de tétrachlore éthylène (une vraie piscine !) entouré par un ralentisseur de neutrons d'à peu près le même volume et qui contient simplement de l'eau.

Le principe de l'expérience tient en la capture d'un neutrino par un atome de chlore 37 qui est alors transformé en argon 37. Il ne s'en fabrique pas beaucoup. Pour l'extraire, on fait barboter de l'hélium qui passe dans des vases Dewar qu'on refroidit à la température de liquéfaction de l'argon. En réalisant ce barbotage en circuit fermé, l'hélium 4 entraînant l'argon 37, on finit par accumuler l'argon 37 dans un vase Dewar qu'on transporte avec précaution au laboratoire pour mesurer sa radioactivité. La période de radioactivité de l'argon 37 étant d'environ un mois, il n'y a pas intérêt à faire durer l'expérience sur une durée plus longue. L'extraction par barbotage dure 24 ou 48 heures. Après quoi on recommence l'expérience, de mois en mois, ceci depuis plus de vingt ans.

L'expérience n'est pas facile: quand on rapporte ce vase au laboratoire, on compte environ dix "coups" par jour, il faut donc prendre beaucoup de précautions pour se préserver de tous les parasites. On a une idée de l'écart entre la prévision théorique et la mesure. Ainsi Fowler, en 1950, prévoyait mille unités de flux et c'est pourquoi Davies avait commencé l'expérience avec un réservoir de tétrachlore éthylène d'un mètre cube. Aujourd'hui les prévisions théoriques convergent autour de 7 unités de flux (l'unité, SNU, "solar neutrino unit" correspond à une capture par 10^{36} atomes par seconde). La mesure se stabilise autour de 2 unités de flux (2,2±0,4). Observateurs et théoriciens conviennent que les modèles standards du Soleil sont en désaccord avec ce qu'on mesure d'un facteur compris entre 3 et 4.