

Les neutrinos solaires

par Evry SCHATZMAN,

Observatoire de Nice B.P. 252, 06007 Nice Cedex.

Le texte de la Conférence de M. le Professeur Evry Schatzman, donnée à la fin de l'Assemblée Générale du C.L.E.A., le 22 janvier 1983 a été publiée dans les Cahiers Clairaut nos 21 et 22 (été et automne 1983).

L'autorisation de reproduire le texte de la Conférence, dans le Bulletin de l'Union des Physiciens, nous a été aimablement donnée par le Directeur de la publication : M^{lle} L. Gouguenheim et par M. le Professeur Evry Schatzman.

Pour information des lecteurs du B.U.P., signalons que M. le Professeur Evry Schatzman a récemment reçu une des plus hautes récompenses scientifiques françaises : la Médaille d'or du C.N.R.S.

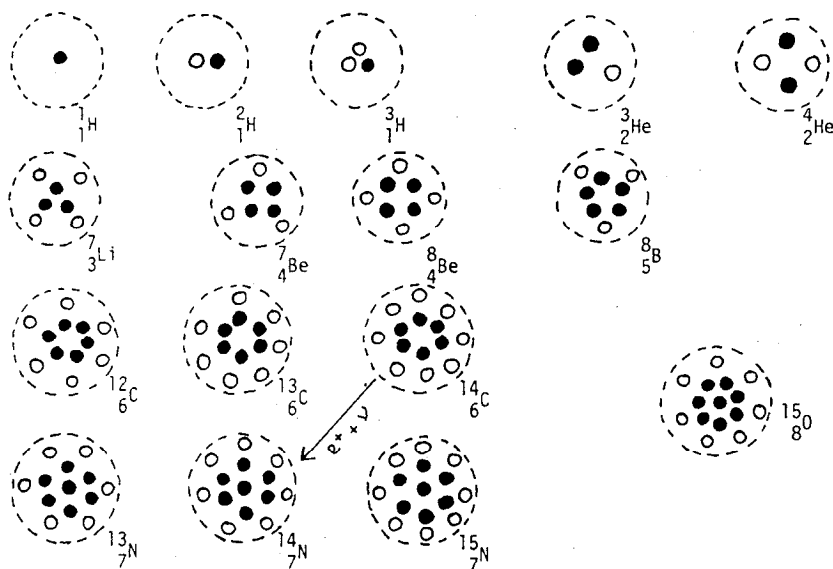
Pourquoi avoir choisi ce sujet ? D'abord parce que je m'y intéresse et, plus encore, parce que, comme vous allez le voir il réunit des aspects variés de la physique : problèmes de physique des particules, celui des neutrinos en particulier, problème du Soleil dans son ensemble et enfin des expériences 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 :

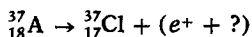
- trois variétés d'hydrogène, le proton ${}_1^1\text{H}$, le deutéron ${}_1^2\text{H}$ et le noyau de tritium ${}_1^3\text{H}$,
- deux variétés d'hélium, l'hélium 4 avec deux protons et deux neutrons ${}_2^4\text{He}$, et l'hélium 3 à deux protons et un neutron ${}_2^3\text{He}$.

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.



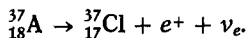
La découverte de la radioactivité, due aux travaux des CURIE sur le radium, il y a à peu près trois-quarts de siècle, a été appelée *radioactivité naturelle*. Terme impropre, car la radioactivité du carbone 14 étant tout aussi « naturelle » que celle du radium, mais la durée de vie du carbone 14 étant 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 du noyau 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 :



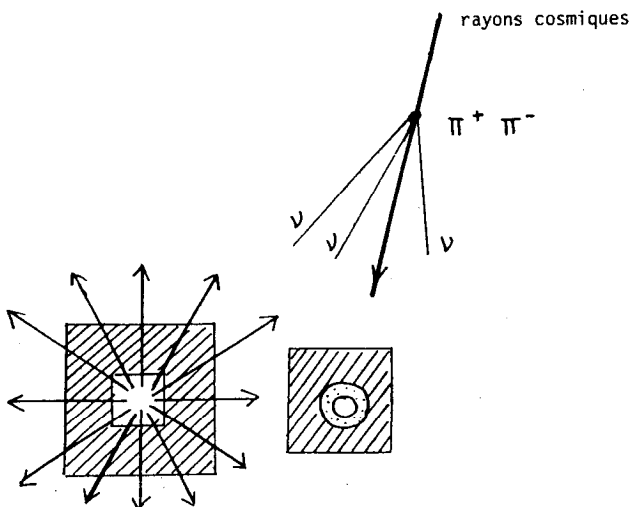
Le principe de conservation de l'énergie étant sauf, il fallait se demander quelle était cette particule nouvelle, quelles étaient ses propriétés. On reconnut rapidement que c'était une particule très difficile à attraper « au vol » pour l'étudier. En vous projetant un transparent vierge, je peux vous 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 $1/100 \times 10^9$ (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).

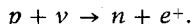
On se place au voisinage d'un réacteur à haut flux, un réacteur nucléaire dans lequel l'uranium est transformé en plutonium. Un grand flux de neutrinos est émis. On place un détecteur aussi près que possible pour se protéger de tous les parasites en particulier les rayons cosmiques, représentés sur le 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.

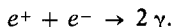


Le blindage du récepteur est épais. Selon la petite histoire, COWAN et REINES se seraient procuré un torpilleur à la casse et auraient ainsi utilisé pour faire écran de mille à mille deux cents tonnes de fer. Les neutrinos traversent le béton du réacteur puis le blindage du détecteur et atteignent enfin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

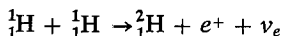
Dans l'expérience de COWAN et REINES, en 1956, on utilisait un scintillateur de 30 litres, — une pousse pour l'époque

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.

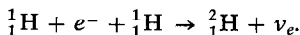
LES NEUTRINOS SOLAIRES.

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.

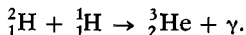
Au départ, la réaction proton-proton : deux protons réagissent en donnant un deutérium, un électron positif et un neutrino :



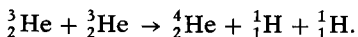
en même temps, mais dans une bien moindre proportion, 1/400 environ, deux protons réagissent avec un électron négatif pour donner un deutérium et un neutrino :



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 :

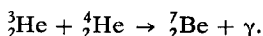


Alors plusieurs modes d'évolution s'ensuivent ; dans le plus fréquent, 91 % des cas, deux noyaux d'hélium 3 interagissent pour donner un hélium 4 et deux protons :

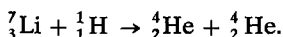
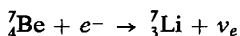


Si on comptabilise les protons qui interviennent, quatre pour former les deux deutérium [soit dans la réaction proton-proton (*pp*), soit dans la réaction proton-électron-proton (*pep*)], deux pour réagir sur les deux deutérium produits, en tout six protons ; on en retrouve deux en fin de circuit ; globalement,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

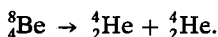
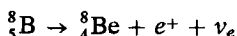
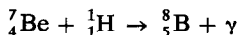
Il peut aussi arriver que les hélium 3 et 4 produits interagissent pour donner du béryllium et un photon :



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 :

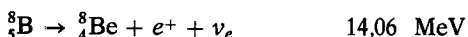
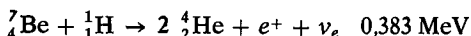
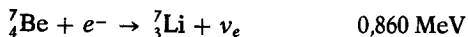
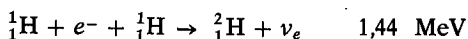
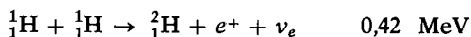


Ou bien (mais beaucoup plus rarement), le béryllium capte un proton pour donner du bore et un photon, le bore redonnant spontanément un béryllium, un électron positif et un neutrino, ce qui nous intéresse le plus pour la suite :



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 maximale 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 selon 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.

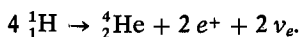
L'expérience n'est pas facile : quand on rapporte ce vase au laboratoire, on compte environ dix « coups » par jour, il faut donc prendre beaucoup de précautions pour se préserver de tous les parasites. On a une idée de l'écart entre la prévision théorique et la mesure. Ainsi FOWLER, en 1950, prévoyait 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^{26} atomes par seconde). La mesure se stabilise autour de 2 unités de flux ($2,2 \pm 0,4$). 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.

MODELES SOLAIRES.

De quoi disposons-nous pour décrire l'intérieur du Soleil et construire un modèle solaire ? D'abord trois données fonda-

mentales : sa masse $m = 2 \times 10^{30}$ kg ; son rayon $R = 7 \times 10^8$ m ; sa luminosité, c'est-à-dire la puissance qu'il rayonne : $3,6 \times 10^{26}$ W. Ensuite, une connaissance raisonnable de sa composition chimique : 75 % de sa masse en hydrogène, 23 % en hélium, 2 % en carbone, azote, oxygène, néon, magnésium, silicium, fer, etc.

L'idée sur la source d'énergie du Soleil a été formulée par Jean PERRIN en 1924 puis mise au point par BETHE avec la réaction proton-proton qui peut globalement se résumer par la formule :



Le problème du modèle solaire est de déterminer en fonction de la distance r au centre du Soleil les trois grandeurs, pression $P(r)$, densité $\rho(r)$, température $T(r)$. Ceci en faisant le moins d'hypothèses possibles — même s'il est inévitable d'en faire faute de pouvoir effectuer des prélèvements ou des mesures à l'intérieur du Soleil —, pour obtenir la physique la plus simple possible.

Pour la *pression*, pas d'hypothèse supplémentaire ; il y a équilibre hydrostatique, la pression croît de l'extérieur vers l'intérieur.

Pour la *température*, le transport de chaleur est gouverné par le rayonnement. C'est un peu ce qui se produit dans la matière solide c'est-à-dire la conductivité thermique que nous connaissons dans les objets familiers. Seulement, au lieu que la chaleur soit transportée par le mouvement des atomes, ici c'est par la lumière, par le mouvement des photons. Le plus délicat est d'avoir une écriture correcte du transport de chaleur par les photons.

Ce qu'on connaît le mieux, ce sont les *réactions nucléaires*. Les mesures de laboratoire fournissent les « sections efficaces », ce qui revient à connaître les vitesses de réaction. Celles-ci sont très contrôlables et conduisent à des résultats bien établis. La température centrale ainsi obtenue est 15×10^6 K, grandeur qu'il est bien difficile de se représenter sous cette forme. Elle correspond à une énergie de 1,28 keV, c'est-à-dire quelque chose de très commun et qui n'a rien à voir avec la physique des hautes énergies — bien que le neutrino, lui, ait à voir avec les hautes énergies.

Le problème du désaccord entre les mesures observées et les modèles du Soleil est tout entier dans la température centrale du Soleil. En effet, si on considère les neutrinos qui proviennent de la désintégration du bore et qui sont pratiquement les seuls à être détectés par le chlore 37, leur flux dépend beaucoup de la température. On peut dire approximativement que le flux est proportionnel à la puissance 20 de la température centrale ; le

bore est produit par une série de réactions toutes sensibles à la température et leur produit entraîne cette proportionnalité à T^{20} . Il en résulte qu'un changement de quelques pour cent de la température fait varier le flux de neutrinos d'un facteur 2 ou 3. Il n'est pas besoin de jouer beaucoup sur la température centrale du Soleil pour obtenir une réduction du flux de neutrinos.

Le désaccord entre mesures et modèle étant constaté, on a pensé qu'il était dû à un défaut du modèle. Il fallait chercher comment réduire la température centrale.

Une première solution envisagée consistait à mélanger la matière solaire. Pourquoi ? On le comprend en imaginant que la matière solaire ne se mélange pas du tout ; alors l'hydrogène s'épuise dans la région centrale où la concentration en hydrogène diminue et pour rattraper la luminosité observée il faut augmenter la température centrale. Au contraire, un mélange de la matière apporte de l'hydrogène au centre et on peut retrouver la luminosité observée avec une température centrale plus basse. Cependant, si on fait le calcul, on s'aperçoit que mélanger ne suffit pas, on ne réduit pas assez le flux de neutrinos.

Une autre solution consiste à chercher comment diminuer la pression gazeuse au centre et par conséquent la température. Par exemple, on peut ajouter la contribution d'une pression magnétique. La pression gazeuse est réduite d'autant. Mais le calcul conduit à exiger un champ considérable, de l'ordre du milliard de gauss. On peut aussi supposer que l'intérieur du Soleil tourne très vite sur lui-même, la force centrifuge faisant ainsi diminuer la pression centrale.

On rencontre deux obstacles :

- 1) si la région centrale est moins dense et moins chaude avec un très fort champ magnétique, des « bulles de champ magnétique » devraient se produire et être observées en surface ; on n'observe rien de semblable ;
- 2) si l'intérieur du Soleil tournait assez vite pour qu'on obtienne au centre l'abaissement de température souhaité, le Soleil serait beaucoup plus aplati qu'il ne paraît l'être à l'observation. Des mesures de l'aplatissement du Soleil ont été faites et refaites avec beaucoup de soin et la période minimale de rotation au centre compatible avec ce qui est observé serait comprise entre un et deux jours, pour une période en surface de 29 jours. Alors que pour obtenir l'abaissement désiré de la température centrale il faudrait une période de 2 heures.

Bref, il faut trouver autre chose.

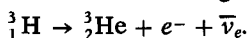
OSCILLATION DU NEUTRINO.

L'autre hypothèse possible serait que le neutrino est plus compliqué qu'on ne l'a cru d'abord. Il y a trois sortes de neutrinos :

- le neutrino ν_e , produit par les électrons, ce qui est le cas des neutrinos solaires,
- le neutrino ν_μ , produit par les muons,
- le neutrino ν_τ , produit par la décomposition du méson tau.

Si le neutrino a une masse, alors il peut y avoir transformation d'une sorte de neutrino et une autre sorte, c'est le phénomène appelé « *oscillation* ». Pour savoir, si cela se produit pour les neutrinos ν_e du Soleil, il faut donc tenter de mesurer la masse du neutrino.

La première méthode de mesure, tentée par LYUBIMOV en U.R.S.S. en 1980 est fondée sur la désintégration bêta du tritium :

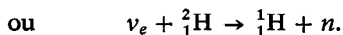
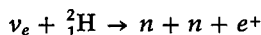


On étudie le spectre d'énergie des électrons produits et on compare avec le spectre prédit ; on constate une différence dont on déduit la masse du neutrino. Mesure difficile car la différence est très petite, de l'ordre de la dizaine d'électron-volt alors que l'énergie en jeu est de 18 000 eV. On trouverait une masse de 35 eV. Il faut attendre confirmation. Des mesures récentes donnent une limite supérieure de 6 eV.

Une autre méthode consiste à mesurer les oscillations. On complète le dispositif de l'expérience de COWAN et REINES en ajoutant un second détecteur, identique au premier, un peu plus loin. Si le neutrino se conserve « en vol », le nombre de neutrinos reçus dans le second détecteur ne diffèrera du nombre décelé par le premier que par l'élargissement du faisceau émis par le réacteur. Si des neutrinos sont perdus en cours de route (parce que transformés en neutrinos non décelables par le chlore 37) le nombre de neutrinos reçus dans le second détecteur sera sensiblement plus petit.

L'expérience a été faite à l'Institut Langevin-Von Laue de Grenoble et à Los Alamos. Dans les deux cas, l'expérience a été négative ; on n'a pas constaté d'oscillation avec une assurance de 90 % sur le résultat.

REINES a fait aussi une expérience indirecte. Près d'un réacteur, la capture d'un neutrino par un deutérium peut donner soit deux neutrons et un électron positif soit un proton et un neutron :



S'il y a mélange de neutrinos, toutes les espèces de neutrinos vont casser les atomes de deutérium mais seuls les neutrinos ν_e pourront produire $n + n + e^+$. Par conséquent, en évaluant le pourcentage des divers composants, on doit, en principe, pouvoir déduire le pourcentage des neutrinos ν_e sur l'ensemble des neutrinos et avoir ainsi la preuve des oscillations. L'expérience est très délicate et donne aussi une masse du neutrino comprise entre 10 et 30 eV. Mais cela demande confirmation puisque les expériences précédentes donnaient un résultat négatif.

EFFET D'UN TRANSPORT PAR TURBULENCE.

Une autre idée, sur laquelle nous avons travaillé, M. MAEDER, de l'Université de Genève et moi-même, consiste à introduire un phénomène bien connu en milieu turbulent, le transport par phénomène macroscopique d'un contaminant du fluide. Ainsi, la trainée laissée par un avion dans le ciel disparaît peu à peu par un effet de turbulence de la haute atmosphère. Ou encore la forme aléatoire de la fumée d'une usine.

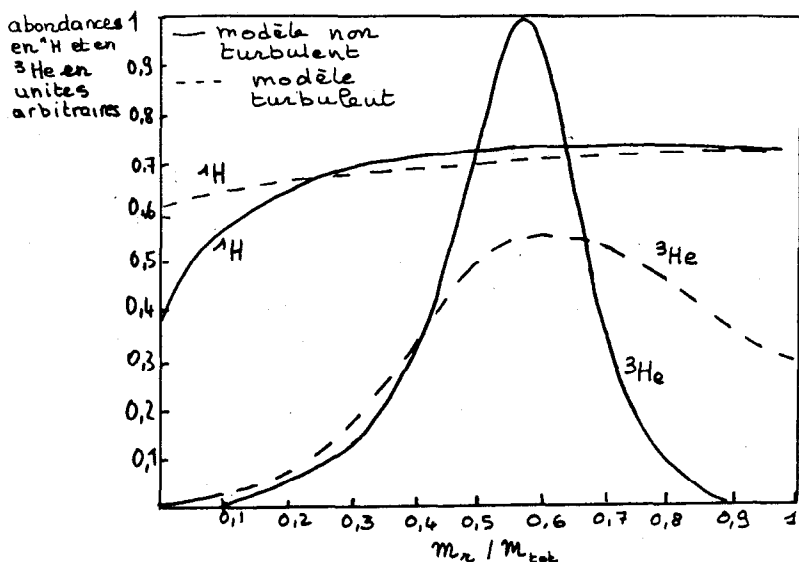
Imaginons alors que dans le Soleil, même dans les couches les plus stables, des phénomènes analogues, très lents, réalisent un transport de matière. Dans les régions les plus internes du Soleil, la concentration en hélium 3 résulte de l'équilibre entre la production et la destruction de ce noyau atomique ; la concentration d'équilibre dépend de la température et augmente lorsque la température décroît. Dans les couches extérieures, il y a encore fabrication d'hélium 3 mais moins de destruction, par conséquent l'hélium 3 s'accumule. L'accumulation de l'hélium 3 observé dans les couches extrêmes pendant la vie du Soleil soit 4,6 milliards d'années, engendre, entre le centre et la surface, un maximum de concentration en hélium 3 extrêmement pointu (voir fig. ci-après).

En introduisant un mécanisme de transport par turbulence, on va amener de l'hélium 3 en surface et vers le centre. Rappelons que dans un modèle sans transport, on aura 20 % de l'énergie fournie par l'hélium 3 alors qu'avec le transport, ce serait près de 40 %. Globalement, l'apport d'hélium 3 au centre par transport aboutit à un accroissement de l'énergie disponible.

Or, la luminosité L du Soleil est due uniquement au taux de la réaction proton-proton (dite pp). Elle est réglée par la température dans les régions centrales et, comme elle fait intervenir deux noyaux de même espèce, le terme est proportionnel au carré de la concentration X en hydrogène. Quant à la dépendance de la température T elle est approximativement en T^4 :

$$L \propto X^2 T^4.$$

Si la concentration X en protons au centre augmente, ou ce qui revient au même la quantité d'énergie disponible par proton, on



Proportion de la masse totale contenue à l'intérieur de la sphère de rayon r .

parvient à diminuer suffisamment la température centrale T pour que le flux de neutrinos calculé soit à peu près celui qui est observé.

PERSPECTIVES D'AVENIR.

On espère que divers procédés expérimentaux pourront être utilisés pour vérifier cette explication. Grâce à une large coopération internationale qui groupe une demi-douzaine de grands laboratoires, on se préoccupe d'utiliser un autre détecteur que le chlore : le *gallium* dont le seuil de capture des neutrinos est à 0,231 MeV. Ce qui lui permettra de détecter non seulement les neutrinos provenant de la radioactivité du bore mais essentiellement ceux qui proviennent de la réaction pp . Or, les réactions pp sont les réactions de départ du cycle de production de l'énergie solaire. Le nombre de neutrinos provenant du cycle pp dépend donc uniquement de la luminosité solaire. Seuls, les flux des autres neutrinos (principalement ceux du bore) dépendent des conditions physiques, c'est-à-dire de la température. Dans l'expérience projetée avec le gallium, la majorité des neutrinos provient de la réaction pp et on ne sera plus tributaire de la température centrale. Autrement dit, le détecteur au gallium nous donnerait essentiellement le flux des neutrinos pp , flux ne dépendant pas du modèle, mais seulement des réactions nucléaires.

Pourquoi cette mesure est-elle importante ? Si le neutrino oscille entre plusieurs variétés, les neutrinos détectés par le chlore peuvent être moins nombreux qu'on ne les a calculés puisqu'ils peuvent s'être transformés en neutrinos non décelables par le chlore. On devrait constater le même déficit de neutrinos en provenance de la réaction pp pour la même raison dans le cas de l'expérience au gallium. Au contraire, si les effets sont comme on dit modèle-dépendants pour les neutrinos de basse énergie, on a, à peu de choses près, le flux prévu et c'est par la modification du modèle que l'on ramènera le flux de neutrinos en provenance du bore au flux observé.

L'expérience a été faite avec 4,6 tonnes de chlorure de gallium ; elle a montré qu'on peut extraire 97 % des produits de la réaction neutrino-gallium. Mais pour faire l'expérience sur les neutrinos solaires, il faut voir grand, utiliser 50 tonnes de gallium, ce qui représente la production annuelle mondiale de ce métal ! Il faudrait un mécène pour fournir les 50 tonnes nécessaires !

On peut penser que d'ici quelques années on aura la réponse au problème de la masse du neutrino et à celui des neutrinos solaires. L'affaire est aussi importante pour la physique du Soleil que celle du neutrino.

Si l'expérience au gallium donne le flux de neutrinos directement associé à la luminosité du Soleil, on aura, entre expériences au sol et mesure des neutrinos solaires, la preuve qu'il n'y a pas d'oscillation, ce qui implique presque certainement que la masse du neutrino est nulle.

Au C.E.R.N. de Genève, deux nouvelles particules viennent d'être découvertes, le méson W chargé et le méson Z neutre. Ces particules avaient été introduites par la théorie pour expliquer essentiellement la très faible portée des interactions du neutrino. Leur existence latente commande le très petit rayon d'action des interactions faibles. Mais elles apparaissent lorsque l'énergie est suffisante. Ceci est lié aux propriétés du neutrino. Cela prouvera — à mon avis, c'est vraisemblable, — qu'il n'y a pas d'oscillation et que la masse du neutrino est nulle. Ce qui contribuera à faire un pas en avant important en physique.

Si l'hypothèse de la diffusion turbulente se confirme, cela constituera un argument de poids sur l'importance plus grande qu'il faut apporter au phénomène macroscopique de la turbulence.

(Texte transcrit par G. Walusinski de l'enregistrement pris en séance de la conférence prononcée par E. Schatzman lors de l'Assemblée Générale du C.L.E.A., le 22 janvier 1983.)
