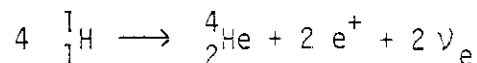


LES NEUTRINOS SOLAIRES
(suite et fin)

MODELES SOLAIRES

De quoi disposons-nous pour décrire l'intérieur du Soleil et construire un modèle solaire ? D'abord trois données fondamentales: 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 13×10^8 K, grandeur qu'il est difficile de se représenter sous cette forme. Elle correspond à une énergie de 1,12 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.

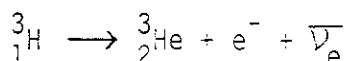
OSCILLATION DU NEUTRINO.

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 en 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 URSS en 1980 est fondée sur la désintégration bêta du tritium:

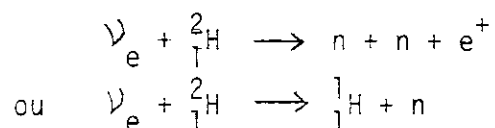


On étudie le spectre d'énergie des électrons produits et on compare avec le spectre prédit ; on constate une différence dont on déduit la masse du neutrino. Mesure difficile car la différence est très petite, de l'ordre de la dizaine d'électron-volt alors que l'énergie en jeu est de 18 000 eV. On trouverait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

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 différera 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.

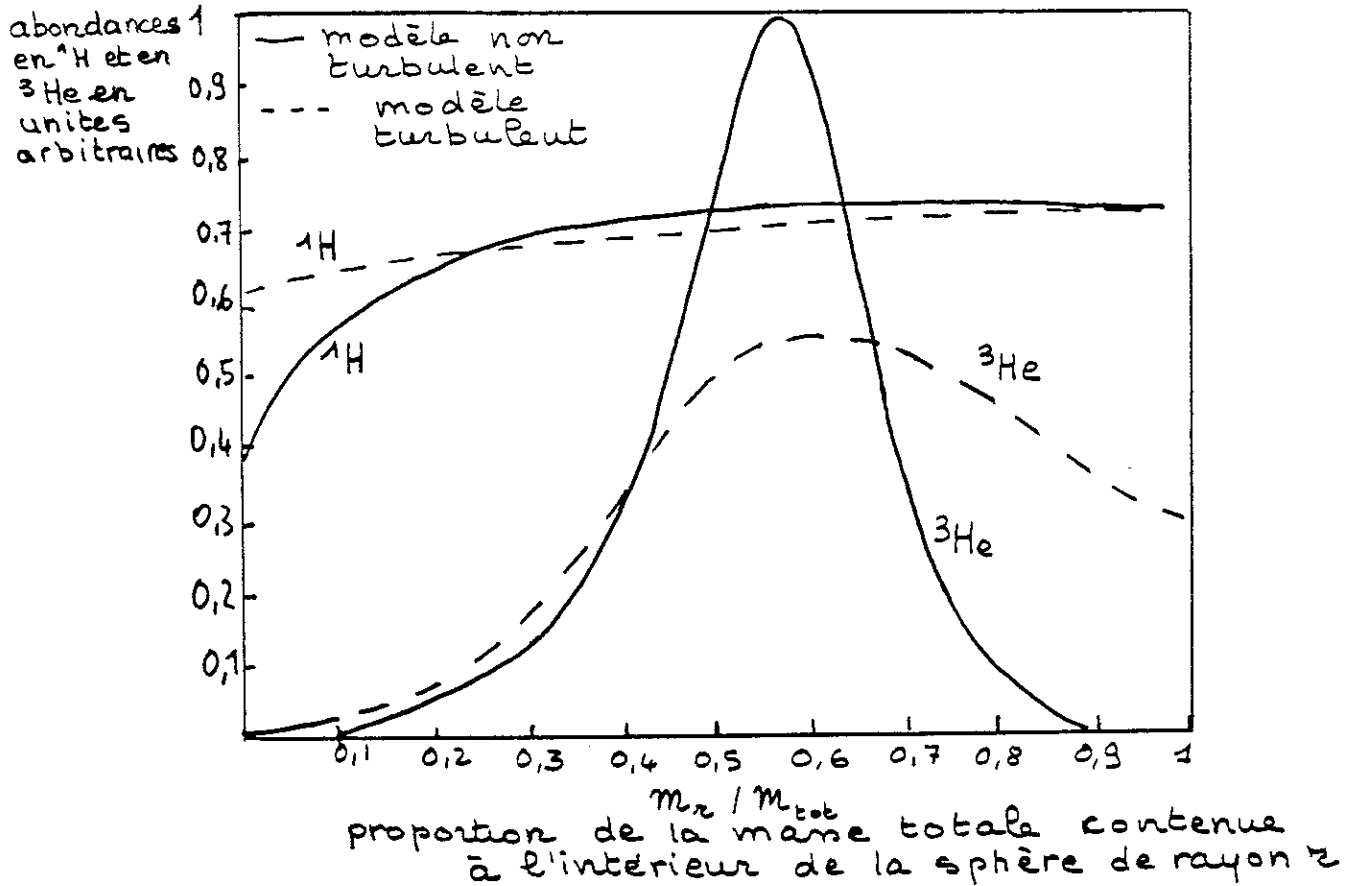
EFFET D'UN TRANSPORT PAR TURBULENCE.

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 traînée 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 externes 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 figure page suivante).

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 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 neutrini-

nos 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 CERN 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.

E. Schatzman

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

LA CHASSE AUX PERLES

Dans notre série "La chasse aux perles", voici un extrait de "L'Homme et ses inventions" d'André Lefèvre, éditions TOURET; (livre de vulgarisation destiné aux jeunes lecteurs).

Au chapitre: "l'optique", après quelques paragraphes signalant l'invention et l'utilisation des lentilles de verre pour les corrections de la vue, l'auteur termine ainsi (page 39):

"Mais la science de l'optique ne se résume pas aux seules lunettes. Sa pénétration s'opère dans de multiples industries, ou dans différentes sciences: la médecine l'astronautique, l'électronique, l'astrologie, etc...

Et l'on peut, peut-être, espérer que les hommes, nantis des derniers perfectionnements de la science optique y verront clair dans leur destinée."

ZODIACAL ! TRANSPARENT ! SANS AUTRE COMMENTAIRE .

transmis par Daniel BARDIN