Après quarante années de recherches, l'énigme des neutrinos solaires – en déficit persistant dans les détecteurs sur Terre – a trouvé sa solution. Les connaissances sur les réactions nucléaires de fusion, à l'origine de l'énergie du Soleil et des autres étoiles, sont suffisamment matures pour pouvoir prédire avec précision la source d'émission de ces particules. Il est désormais établi que le déficit en neutrinos solaires observé est dû à une propriété étonnante des neutrinos : ces espiègles particules se transforment en cours de route !

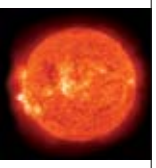
Les neutrinos solaires, une énigme enfin résolue

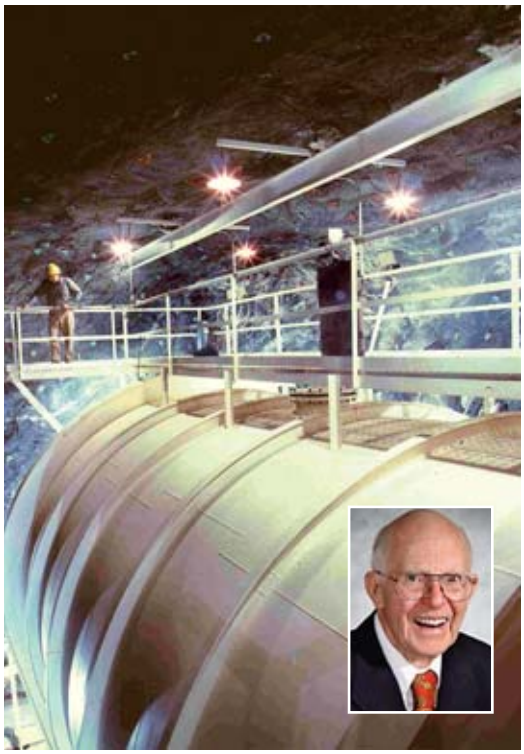
SNO

Vue lors de sa construction de la cible de l'Observatoire de neutrinos de Sudbury (SNO) qui est composée de 1 000 tonnes d'eau lourde enfermées dans un récipient de plastique acrylique. Ce volume est observé par 9 600 détecteurs portés par la structure métallique.

Pendant longtemps les scientifiques se sont interrogés sur les mécanismes capables de fournir la puissance considérable ($3{,}86 \cdot 10^{26}$ **watts**) rayonnée par le Soleil depuis des milliards d'années. La réponse, élaborée à partir de 1938, montre que c'est essentiellement la **fusion** de quatre **noyaux** d'**hydrogène** (**protons**) en un noyau d'**hélium** (deux protons et deux **neutrons**) qui fait briller le Soleil et les étoiles qui lui ressemblent (voir *Soleil nucléaire*). Chaque fusion de ce type libère environ 27 **MeV** ($4{,}4 \cdot 10^{-12}$ joule), mais aussi deux **neutrinos**. Nous devons donc recevoir sur Terre 65 milliards de ces neutrinos par seconde et par centimètre carré.

Depuis maintenant quarante ans, les expérimentateurs se sont lancés dans la détection des neutrinos du Soleil. C'est l'expérience au chlore, conçue par un chimiste américain, Raymond Davis, qui l'a réussie la première. Dans un article paru le 20 mai 1968, Davis montre que le flux de neutrinos enregistré par son détecteur ne représente que 30 % des prédictions des modèles solaires. Il faut attendre 1988 pour qu'un second détecteur, Kamiokande, au Japon, construit sous l'impulsion de Masatoshi Koshiba, confirme ce déficit, vérifiant en outre que les neutrinos provenaient effectivement du Soleil.





Courtoisie Brookhaven National Laboratory

Le réservoir de l'expérience historique de Raymond Davis (en médaillon), pièce essentielle de l'expérience de détection des neutrinos conduite à partir des années 60 dans la mine de Homestake (Dakota du Sud).

À la fin des années 80, deux collaborations, Sage et Gallex, construisent des expériences utilisant du gallium dans lesquelles les neutrinos de faible énergie (au-dessus de 233 **keV**) peuvent transmuter du gallium en germanium. En 1992, la collaboration européenne Gallex annonce la première observation des neutrinos produits dans la réaction de fusion **primordiale** entre deux protons au **cœur** du Soleil, réaction à l'origine de l'énergie produite par notre étoile. Elle souligne toutefois que le flux de neutrinos mesuré est inférieur d'un bon tiers aux prédictions des astrophysiciens. L'expérience Sage confirme bientôt un déficit semblable.

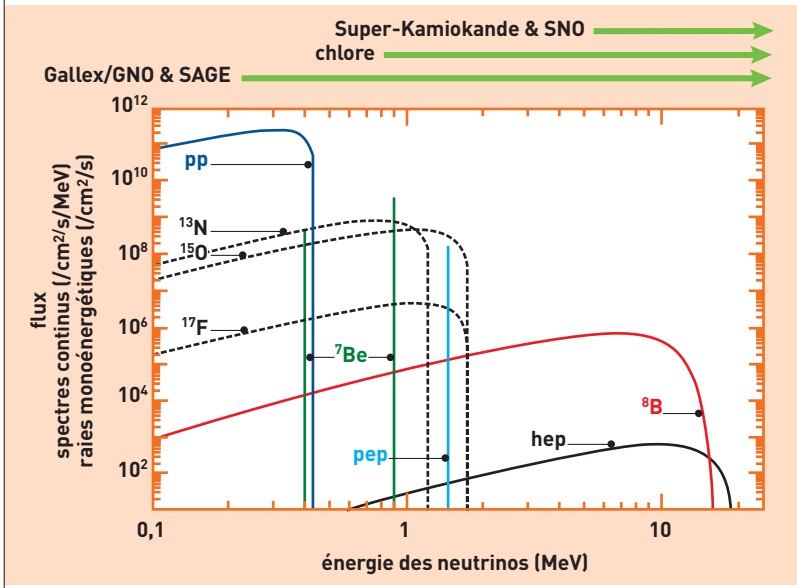


Figure 1.
Le spectre en énergie des neutrinos solaires. Le flux total de neutrinos solaires sur Terre s'élève à 65 milliards par cm² par seconde. Il est dominé par les ν_{pp} (60 milliards), les neutrinos du bore n'en représentant que 6 millions. Leur énergie plus grande rend leurs détections plus aisées. La gamme de sensibilité des différentes expériences est représentée en haut du schéma.

Deux pistes sont alors possibles : remettre en cause nos idées sur le fonctionnement des étoiles ou invoquer de nouveaux phénomènes dans la physique des neutrinos et le **modèle standard** des particules (encadré C, ***Particules élémentaires et interactions fondamentales***, p. 38).
Les progrès de l'**héliosismologie** confortant les modèles du Soleil, les soupçons se renforcent à l'égard des neutrinos. Finalement, en 2001, l'expérience SNO (*Sudbury Neutrino Observatory*) démontre que ces soupçons étaient justifiés : les neutrinos produits au centre du Soleil, dans le nombre attendu, changent de nature avant d'arriver sur Terre.
C'est cette enquête qui est revisitée ici à la lumière de nos connaissances sur les réactions produisant énergie et neutrinos dans le Soleil. L'analyse des expériences permet de mieux cerner la nature du déficit et de contraindre les explications possibles.

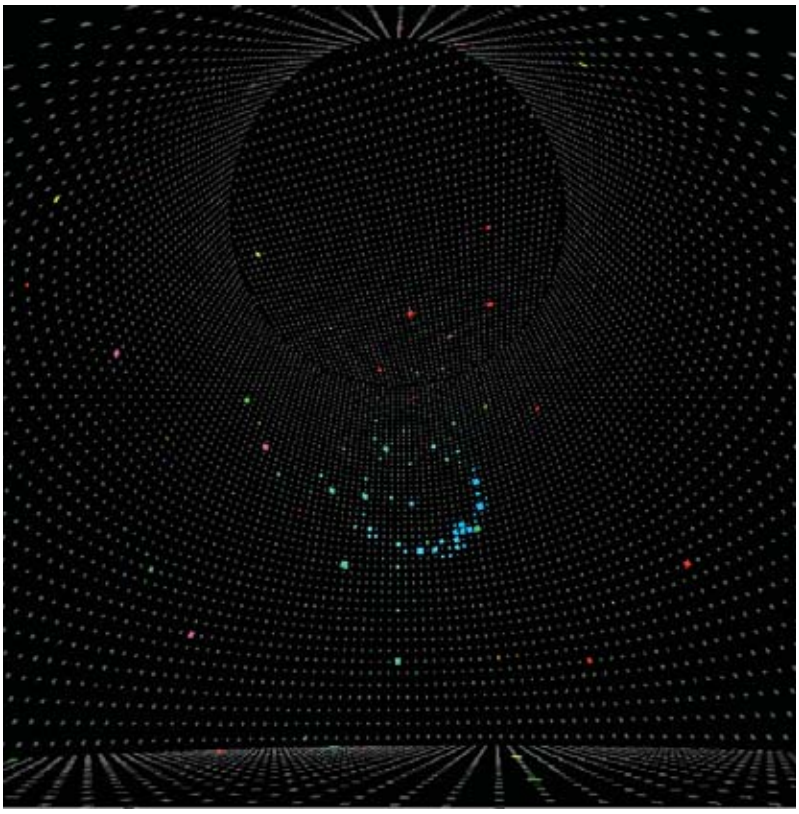
Les neutrinos au cœur du Soleil

Le Soleil est une étoile "banale" comme il y en a des milliards dans l'Univers. Cette gigantesque boule de gaz **ionisé** (essentiellement de l'hydrogène et de l'hélium) est en équilibre entre l'effondrement gravitationnel, dû à sa propre masse, et la pression thermique ; la température centrale (plus de 15 millions de degrés) est suffisante pour que des réactions nucléaires puissent avoir lieu en surmontant la répulsion **électrostatique** entre particules de charge électrique positive (**barrière coulombienne**).
Une chaîne de réactions réalise la fusion entre protons pour aboutir à un noyau d'hélium (voir *Soleil nucléaire*, encadré 1). La fusion de deux protons en un noyau de **deutérium** D ou ^{2}H (composé d'un proton et d'un neutron), avec émission d'un **positon** et d'un neutrino, joue un rôle central : $p + p \rightarrow {}^2H + e^+ + \nu_e$. Cette réaction est une **interaction faible**, dont la relative rareté explique la longévité du Soleil : 92 % des neutrinos solaires (appelés "primordiaux" ou ν_{pp}) sont produits dans cette réaction, mais leur énergie n'excède pas 0,420 MeV. Le deutérium formé est rapidement brûlé pour donner un hélium 3. Dans 85 % des cas, deux hélium 3 fusionnent pour aboutir à un hélium 4 en libérant deux protons. Dans 15 % des cas, un hélium 3 fusionne avec un hélium 4 pour engendrer un béryllium 7. Le béryllium 7 se désexcite en **lithium** par une capture électronique[1] en émettant un neutrino (ν_{Be}) monoénergétique. Mais, très rarement, le béryllium 7 peut aussi capturer un proton, pour former un bore 8 qui se **désintègre** en émettant un neutrino (ν_B) dont le spectre s'étend jusqu'à 15 MeV (figure 1).
Soulignons une différence entre le fonctionnement du Soleil et les installations de fusion que l'homme développe sur Terre (voir le chapitre II) : les applications, tant civiles que militaires, utilisent la fusion entre des noyaux de deutérium et de **tritium**, processus d'**interaction forte** d'où aucun neutrino ne s'échappe directement.

(1) Capture électronique : capture d'un électron des couches internes d'un atome par un proton qui se transforme en neutron avec éjection d'un neutrino.

Curieux neutrinos

Pour les physiciens des particules, les neutrinos sont tout à fait élémentaires, comme les **électrons** ou les **quarks**. Ils font partie des douze briques fondamentales de la matière (encadré C). Bien que notre connaissance des neutrinos ait beaucoup progressé récemment, leurs propriétés restent curieuses. Même si les physiciens savent maintenant qu'ils sont pesants, leurs masses sont si faibles qu'il n'a pas encore été possible de les mesurer. Une certitude : la masse du neutrino le plus lourd est deux millions de fois plus petite que la masse de la particule la plus légère, l'électron. Sans charge électrique, les neutrinos n'interagissent avec la matière que par interaction faible, c'est-à-dire avec une très faible probabilité. Sur 100 000 milliards de neutrinos solaires qui traversent la Terre, moins de un neutrino sera arrêté. Les neutrinos vont donc s'échapper sans problème du cœur du Soleil, contrairement aux **photons**, et, huit minutes après avoir été produits dans une réaction de fusion, traverser la Terre "sans s'en apercevoir". Bien que très difficiles à piéger, les neutrinos jouent un rôle très important dans l'Univers. Des quantités énormes ont été créées aux tout premiers instants de l'explosion initiale, il y a environ 14 milliards d'années. Chaque cm^3 de l'espace contient un peu plus de 300 neutrinos, dix milliards de fois plus que de **nucléons**. Leur masse, bien que trop faible pour expliquer la masse manquante de l'Univers, est suffisante pour que les neutrinos puissent "peser" aussi lourd que toutes les étoiles brillantes de ce dernier !

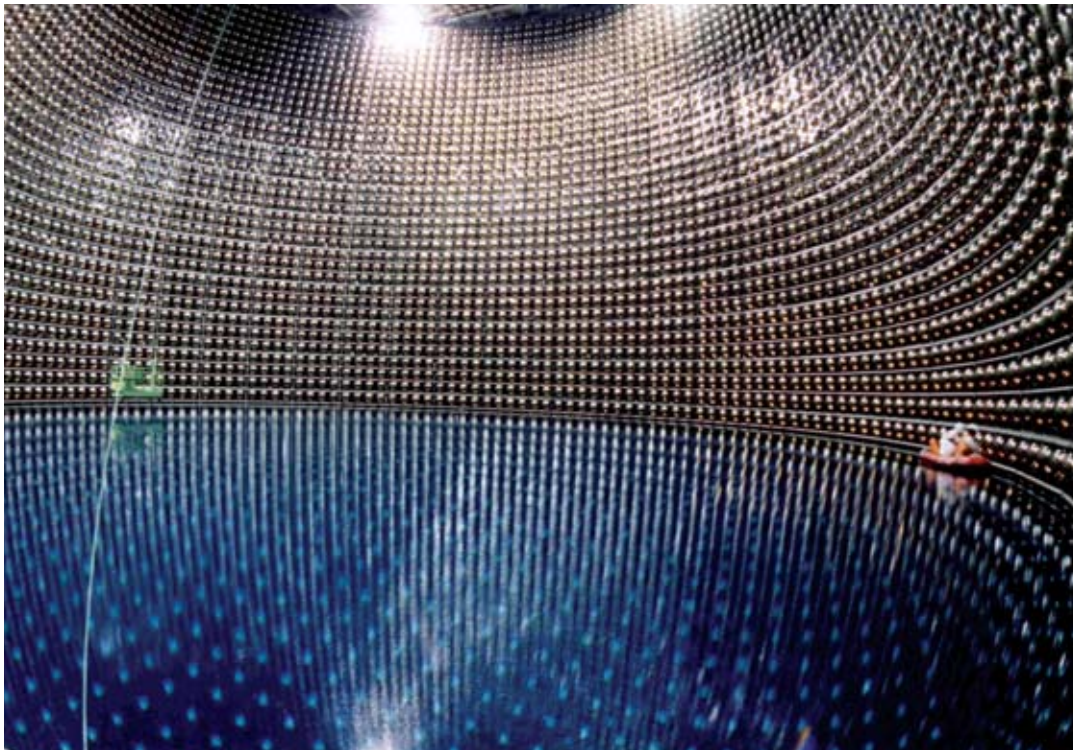


Kamioka Observatory/Tomasz Barszczak

Vue d'un événement enregistré par le détecteur Super-Kamiokande en 1998 (énergie de l'ordre de 12,5 MeV). L'échelle des couleurs est fonction du temps.

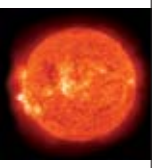
La traque des neutrinos solaires

Quand Raymond Davis construit, en 1968, la première expérience pour détecter les neutrinos solaires, il utilise une réaction β inverse où un neutrino transmute du chlore en argon : $\nu_e + {}^{37}Cl \rightarrow {}^{37}Ar + e^-$. Cinq ou six fois par an, l'argon 37 généré dans l'expérience est entraîné par un flux d'hélium. Cet **isotope radioactif** se désintègre avec une **période** de 50 jours en émettant un rayonnement caractéristique. La probabilité de cette réaction est très faible, et elle ne peut se produire que si le neutrino a une énergie supérieure à 814 keV. En disposant 615 tonnes de tétrachloréthylène (C_2Cl_4) au fond de la mine d'or de Homestake au Dakota du Sud (États-Unis), Davis pensait observer



Kamioka Observatory, ICRR (*Institute for Cosmic Ray Research*), The University of Tokyo

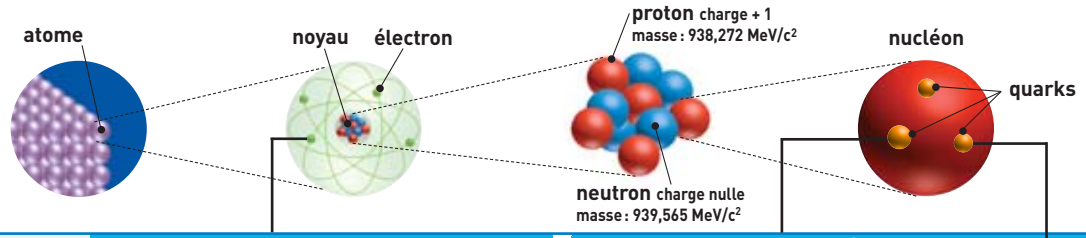
Le détecteur Super-Kamiokande.



C Particules élémentaires et interactions fondamentales

Les neutrinos sont les plus furtives des particules du modèle standard de la physique des particules, cadre théorique qui décrit toutes les particules élémentaires connues et les interactions fondamentales auxquelles elles participent (tableau).

Les constituants élémentaires de la matière, les fermions, se partagent en deux grandes catégories, les leptons qui ne répondent pas à l'interaction forte, et les quarks qui subissent toutes les interactions. Les six quarks forment trois paires (bas/haut, étrange/charmé et beauté/top). Dans la catégorie des leptons, les leptons chargés (électron e^-, muon μ, tau τ) participent à l'interaction électromagnétique et à l'interaction faible et les leptons neutres (neutrino électronique ν_e, neutrino muonique ν_μ, neutrino tauique ν_τ) ne



		leptons peuvent se déplacer librement		quarks prisonniers de particules plus grandes, ils ne sont pas observés individuellement	
Fermions La matière ordinaire est composée de particules de ce groupe.	première famille	**électron** responsable de l'électricité et des réactions chimiques sa charge est - 1 masse : 0,511 MeV/c²	**neutrino électronique** sans charge électrique et interagissant très rarement avec le milieu environnant	**bas** sa charge électrique est - 1/3 le proton en contient un, le neutron deux masse : 5 – 8,5 MeV/c²	**haut** sa charge électrique est + 2/3 le proton en contient deux, le neutron un masse : 1,5 – 4,5 MeV/c²
Pour la plupart, ces particules étaient présentes juste après le big bang. Aujourd'hui, on ne les trouve que dans les rayons cosmiques et auprès des accélérateurs.	deuxième famille	**muon** un compagnon plus massif de l'électron masse : 105,658 MeV/c²	**neutrino muonique** propriétés similaires à celles du neutrino électronique	**étrange** un compagnon plus lourd du "bas" masse : 80 – 155 MeV/c²	**charmé** un compagnon plus lourd du "haut" masse : 1 000 – 1 400 MeV/c²
	troisième famille	**tau** encore plus lourd masse : 1 777 MeV/c²	**neutrino tauique** propriétés similaires à celles du neutrino électronique	**beauté** encore plus lourd masse : 4 000 – 4 500 MeV/c²	**top** le plus lourd de la famille (observé en 1995) masse : 174 300 ± 5 100 MeV/c²
Bosons vecteurs Particules fondamentales qui assurent la transmission des forces de la nature.		**photon** grain élémentaire de la lumière, porteur de la force électromagnétique	**gluon** porteur de la force forte entre quarks	**$W^\pm$, Z^0** porteurs de la force faible, responsables de certaines formes de désintégration radioactive	

Boson de Higgs ? responsable de la "brisure de symétrie électrofaible"

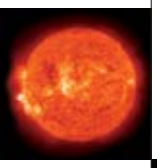
Tableau.
Constituants élémentaires.

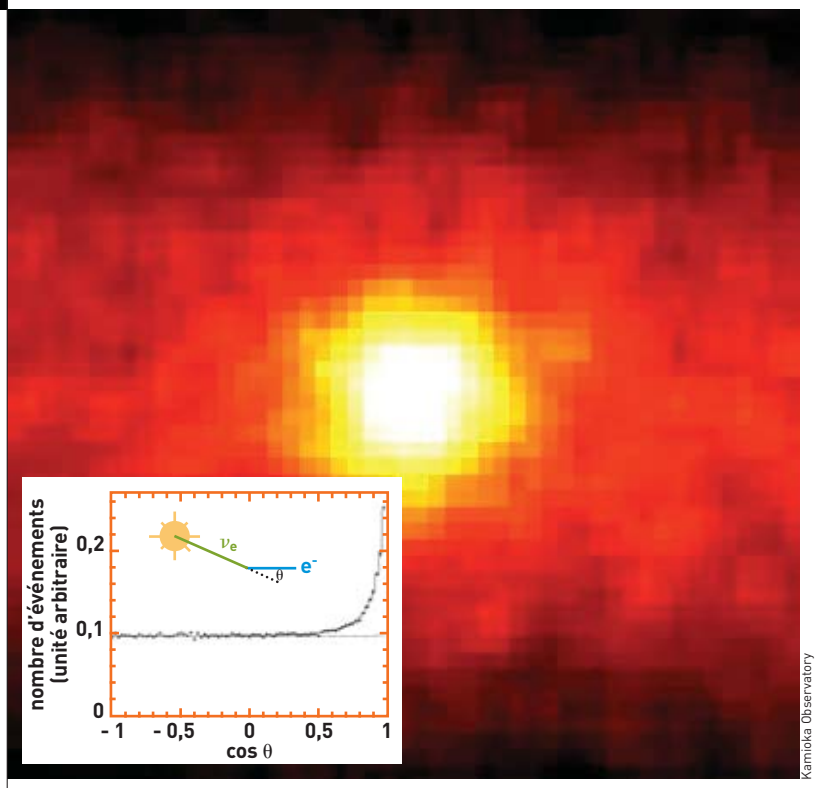
sont assujettis qu'à l'interaction faible. Au sein du modèle standard, les neutrinos sont de masse nulle mais des expériences ont prouvé qu'ils en possèdent une, très faible, dont la valeur exacte reste inconnue à ce jour.
La participation des constituants élémentaires aux interactions fondamentales est conditionnée par leurs nombres quantiques, ou charges d'interaction (charge électrique, charge de couleur[1]...). À chaque constituant de la matière est associée son **antiparticule**, particule de même masse et de charges opposées. La **force gravitationnelle**, qui n'est pas incluse dans le modèle standard, s'exerce sur tous les fermions proportionnellement à leur masse.
Le tableau des constituants élémentaires de la matière montre une autre classification, indépendante de leur participation aux interactions fondamentales, en trois générations ou familles. D'une famille à l'autre, les quarks et les leptons chargés de mêmes charges ne diffèrent que par leurs masses. L'électron, le quark haut et le quark bas, qui appartiennent à la première famille, sont les particules massives les plus légères. Stables, elles sont les constituants de la matière ordinaire. Par exemple, le **proton** contient deux quarks haut et un quark bas ; le **neutron** deux quarks bas et un quark haut. Les particules des deux autres familles sont instables et se désintègrent rapidement en particules stables de première génération. C'est la raison pour laquelle toute la matière stable de l'Univers est faite des constituants de la première famille.
D'après la mécanique quantique, pour qu'il y ait interaction, il faut qu'au moins une particule élémentaire, un **boson**, soit émise, absorbée ou échangée. Le **photon** est le vecteur de l'interaction électromagnétique, les bosons **W^+**, **W^-** et **Z^0** sont les médiateurs de l'interaction faible et les **gluons** les messagers de l'interaction forte.
Les quarks et les leptons chargés échangent des photons mais conservent leur charge électrique après l'échange, le photon n'ayant pas de charge électrique. Comme la masse du photon est nulle, la portée de l'interaction électromagnétique est infinie. Dépourvus de charge électrique, les neutrinos sont les seuls fermions élémentaires à ne pas être sensibles à l'interaction électromagnétique.
Dans la théorie électrofaible (unification des interactions faible et électromagnétique), l'interaction faible présente deux aspects : l'**interaction faible par courants chargés** où les vecteurs de l'interaction sont W^+ et W^-, et l'**interaction faible par courant neutre** où le médiateur de l'interaction est Z^0. Ces deux formes de l'interaction faible agissent entre tous les fermions élémentaires (quarks, leptons chargés et neutrinos). La masse de ces bosons étant très élevée (80 400 MeV/c^2 pour $W^\pm$ et 91 180 MeV/c^2 pour Z^0), la portée de l'interaction faible est infime, de l'ordre de 10^{-18} m. Les bosons $W^\pm$ possédant une charge électrique non nulle, les fermions qui les échangent changent de charge électrique et également de nature (**saveur**). Par contre, le boson Z^0 étant dépourvu de charge électrique, les fermions ne changent pas de nature. En fait, l'interaction faible par courant neutre est assez similaire à l'échange d'un photon. En règle générale, si deux fermions peuvent échanger un photon, ils sont aussi capables d'échanger un Z^0. De son côté, un neutrino a la faculté d'échanger un Z^0 avec une autre particule, mais pas un photon.
Seuls les quarks qui possèdent une charge de couleur échangent des gluons, lesquels portent eux-mêmes une charge de couleur. Ainsi, lors d'un échange de gluon entre quarks, ces derniers échangent leurs couleurs respectives. La masse des gluons est nulle, mais étant dotés d'une charge de couleur ils peuvent interagir. La portée de l'interaction forte est donc très courte, de l'ordre de 10^{-15} m.
Le **graviton**, vecteur de l'interaction gravitationnelle, n'a pas encore été observé.
La théorie prédit l'existence d'un autre mécanisme d'interaction fondamentale, responsable de la masse des particules élémentaires, dont le messager est le **boson de Higgs** qui reste à découvrir. Le champ de Higgs permet, selon cette théorie, de donner une masse aux fermions élémentaires interagissant avec lui.

interaction fondamentale	messager	actions
gravitationnelle	graviton ?	fait s'attirer deux masses entre elles et est responsable de la chute des corps
électromagnétique	photon	est responsable de l'attraction entre électrons et noyaux atomiques, et donc de la cohésion des atomes et des molécules
faible	W^+, W^-, Z^0	à la base de la fusion thermonucléaire dans le Soleil, elle assure sa longévité. La radioactivité β^- et β^+ et les réactions impliquant le neutrino sont des interactions faibles
forte	gluons	assure la cohésion du noyau atomique

Tableau.
Interactions fondamentales.

(1) Charge de couleur : nombre quantique qui détermine la participation aux interactions fortes. La charge de couleur peut prendre trois valeurs : "rouge", "verte" ou "bleue", ces couleurs n'ayant rien à voir avec les couleurs visibles. Chaque quark porte l'une des trois charges de couleur et chaque antiquark l'une des trois charges d'anticouleur. Les gluons sont dotés de charges doubles couleur-anticouleur (huit combinaisons possibles).





Kamioka Observatory

Figure 2.
Le Soleil en neutrinos et le résultat de Super-Kamiokande.
L'interaction d'un neutrino produit un électron de recul qui garde une certaine mémoire de la direction initiale. Le signal venant des neutrinos solaires ressort donc au-dessus d'un bruit de fond **isotrope** dans l'histogramme de l'angle θ entre l'électron et la direction Soleil-Terre à l'instant de l'interaction). Toutefois, les modèles solaires prédisent un signal dans la direction du Soleil (cos θ = 1) plus important que celui mesuré après 5,4 années de fonctionnement. En effectuant une "pose" de 1 496 jours, il est maintenant possible de reproduire cette "neutrinographie" du Soleil, même si son "piqué" n'est pas encore exceptionnel.

une interaction de neutrino par jour. Il en détecte une tous les trois jours seulement. Cette différence entre théorie et observation constitue la base de l'énigme des neutrinos solaires.
L'expérience japonaise Kamiokande, puis son successeur Super-Kamiokande, confirme, à partir de 1988, le déficit. La cible est ici constituée par 2 100 tonnes d'eau très pure. Ce même détecteur capture le 23 février 1987 une douzaine des neutrinos émis depuis le Grand nuage de Magellan par la **supernova** SN1987A. Les interactions des ν_e avec les électrons de l'eau communiquent à ces derniers une impulsion. Les électrons mis en mouvement émettent de la **lumière Čerenkov** observée par une ceinture de photomultiplicateurs(2) disposés tout autour de la cuve. La direction des électrons renseigne sur celle du neutrino incident, prouvant que les neutrinos observés proviennent bien du Soleil (figure 2). Malheureusement, seuls les neutrinos de plus de 5 à 6 MeV créent suffisamment de lumière pour être détectés ainsi. Les résultats confirment, au moins qualitativement, ceux de Davis : le flux de neutrinos solaires constaté est à peu près la moitié des prédictions du modèle standard du Soleil.
Ces deux très belles expériences ont une petite faiblesse : les neutrinos observés viennent essentiellement des réactions nucléaires qui, dans le Soleil, impliquent le béryllium et le bore (voir *Soleil nucléaire*, encadré 1). Elles ne détectent pas les neutrinos solaires primordiaux dont l'énergie est trop basse pour laisser une

(2) Photomultiplicateur : dispositif notamment utilisé en physique nucléaire, dans l'industrie et pour l'imagerie médicale ayant la propriété de convertir la lumière en signal électrique, comportant une cathode photoémissive associée à des multiplicateurs d'électrons.

Les coulisses de Gallex

1

GNO

Extraction chimique du germanium 71 de la solution-cible de chlorure de gallium avant transformation du chlorure de germanium en hydrure de germanium dans le cadre de l'expérience Gallex.

Dans l'expérience Gallex, le gallium est sous la forme d'une solution de chlorure, mélangée à une quantité importante d'acide chlorhydrique et contenue dans un réservoir cylindrique de 8 m sur 4 m. Le germanium produit l'est sous la forme de chlorure, qui a la propriété d'être extrêmement volatil en présence d'acide chlorhydrique. Toutes les trois ou quatre semaines, les expérimentateurs font circuler dans le réservoir plusieurs milliers de m³ d'azote dont les bulles vont entraîner avec elles les molécules de chlorure de germanium qui ne demandent qu'à s'échapper. Un piège, une simple colonne contenant des petits torons de verre, est placé à la sortie du réservoir pour capturer le chlorure ; de l'eau pure y circule de haut en bas alors que l'azote chargé du précieux germanium y circule de bas en haut. L'eau pure capture le chlorure de germanium et laisse l'azote s'échapper.
La deuxième étape consiste à transformer le chlorure en hydrure de germanium (GeH_4). Ce gaz est placé dans un petit compteur *proportionnel* où la **désintégration** par capture électronique du germanium laisse un signal électrique bien caractéristique. Chaque compteur est laissé plusieurs mois dans son blindage de plomb, lui-même placé dans une cage de Faraday où les rayonnements parasites sont réduits à leur minimum. Petits bijoux de quartz taillés et travaillés à la main, ces compteurs sont sélectionnés impitoyablement pour ne garder que les plus performants, ceux qui induiront le moins de bruit parasite.

trace dans leurs détecteurs. L'énigme des neutrinos solaires est bien là, mais peut-être ne concerne-t-elle que les neutrinos produits au bout de la chaîne des réactions nucléaires, pas les "primordiaux". Or, beaucoup savent que la prédiction du flux de ces neutrinos énergiques est particulièrement délicate. Afin de trancher la question, de nouvelles expériences sont alors mises en œuvre.

Gallex, expérience "primordiale"

Pour détecter les neutrinos "primordiaux", les plus nombreux mais les moins énergiques, les physiciens ne trouvent qu'un seul élément sensible, le gallium. Deux expériences l'utilisant voient le jour à la fin des années 80, Gallex et Sage. Collaboration russo-américaine, Sage est installée dans un laboratoire souterrain dans le Caucase. Gallex réunit des physiciens et des chimistes européens (Allemagne, France et Italie), américains et israéliens. Sa cible est constituée de 30 tonnes de gallium. Lorsque les neutrinos solaires interagissent avec ce dernier, ils transforment l'un de ses isotopes, le gallium 71, en un isotope de germanium de même numéro atomique : $\nu_e + {}^{71}Ga \rightarrow {}^{71}Ge + e^-$. Il suffit que l'énergie des neutrinos soit supérieure à 233 keV pour que la réaction soit possible. Ce seuil, bien inférieur à leurs 420 keV d'énergie, rend détectable une bonne partie des ν_{pp}. Radioactif, le germanium 71 se désintègre avec une période de 11,4 jours.
Après avoir exposé le gallium pendant plusieurs semaines aux neutrinos solaires, il faut tout d'abord récupérer les atomes de germanium produits, puis observer leur désintégration (encadré 1). Compte tenu de la masse de gallium et de la théorie, les chercheurs s'attendent à ce que les neutrinos solaires produisent un peu plus d'un atome de germanium par jour.
L'expérience est enterrée dans le laboratoire du Gran Sasso (Italie), au milieu du tunnel autoroutier qui traverse les Apennins, ce qui protège l'expérience des **rayons cosmiques** (essentiellement des **muons**) qui peuvent fabriquer les mêmes atomes de germanium. Depuis son démarrage en 1991, l'expérience Gallex, appelée aujourd'hui GNO (*Gallium Neutrino Observatory*), enregistre les interactions des neutrinos solaires. En faisant le bilan des éphémères atomes de germanium 71, le résultat ne représente que 54 ± 6 % des neutrinos prédits par les calculs. L'expérience Sage, fonctionnant sur un principe très semblable avec une cible de 56 tonnes de gallium métallique, trouve le même résultat.
Si le principe reste très simple, extraire une dose homéopathique de quelques atomes d'un réservoir contenant plusieurs dizaines de tonnes de liquide (10^{30} atomes) constitue une véritable prouesse. Il est alors permis d'être sceptique devant ce résultat. Il est donc important pour les expérimentateurs de le "valider". Gallex sera la première expérience de neutrinos solaires à le faire, au cours de l'été 1994. Il suffira pour cela d'exposer le détecteur à une source artificielle de neutrinos dont le flux est exactement connu, un petit "soleil artificiel".

Un soleil artificiel de neutrinos

Le Soleil ne se laisse pas aisément imiter… même si on se contente de copier la lumière de ses neutrinos (qui représente moins de 1 % de sa puissance totale émise).

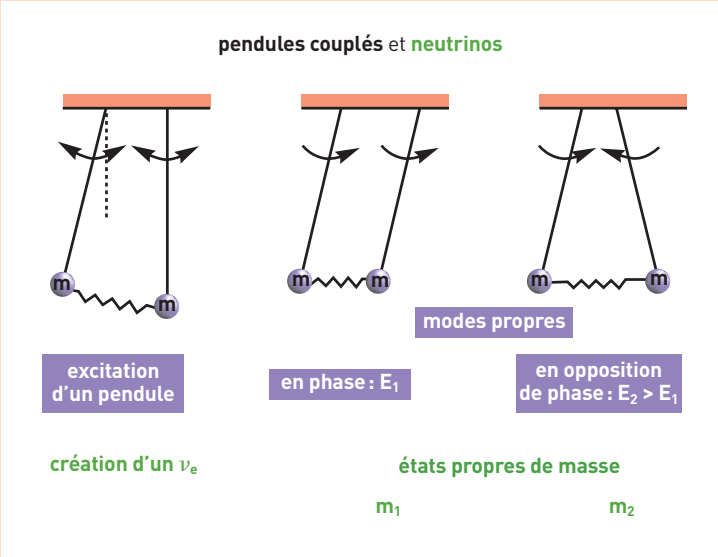
NASA/The Hubble Heritage Team (STScI/AURA)

SN1987A, dans le Grand nuage de Magellan, vue par le télescope spatial Hubble. Le détecteur Kamiokande, au Japon, a capturé le 23 février 1987 une douzaine des neutrinos émis par cette supernova.

Les chercheurs ont néanmoins un avantage : ils ont la possibilité d'approcher leur succédané de Soleil aussi près qu'ils le veulent du détecteur. Mais aussi un inconvénient : ils ne peuvent pas débrancher le Soleil le temps de faire leur mesure. Il faut que le signal de la copie soit beaucoup plus intense que celui de l'original. L'activité de la source, exprimée en **becquerels** (désintégrations par seconde) doit être de quelques dizaines de millions de milliards par seconde, soit quelques dizaines de pétabecquerels (PBq). Une telle activité ferait frémir s'il ne s'agissait de neutrinos, les particules les plus inoffensives qui soient.
Pour fabriquer cette source, un des isotopes du chrome, le chrome 51, a été choisi. En se désintégrant, il n'émet pratiquement que des neutrinos dont l'énergie, 750 keV, est quasiment celle des neutrinos du Soleil. Le chrome 51 s'obtient en irradiant du chrome avec des neutrons, ce qui a été réalisé au cœur du réacteur Siloé, à Grenoble, en 1994.
La source est alors introduite dans le puits aménagé au centre du réservoir de Gallex, irradiant de dix fois plus de neutrinos la cible de gallium. Au bout de trois mois et demi, sa puissance, décroissant imperturbablement avec sa période de 40 jours, n'est alors plus égale qu'à celle du Soleil sur la Terre. Ainsi, la source a produit plusieurs centaines d'atomes de germanium 71. Onze opérations d'extraction et de comptage du germanium sont effectuées, d'une manière identique à celles effectuées avec les neutrinos du Soleil.
Lorsqu'un bilan du nombre d'atomes observé par rapport au nombre d'atomes attendu (compte tenu de l'activité de la source) est réalisé, l'accord est impressionnant : le rapport vaut 0,97 avec une erreur

Les pendules couplés et l'effet MSW 2

L'effet MSW (du nom des physiciens S. P. Mikheyev, A. Y. Smirnov, deux Moscovites, et L. Wolfenstein, de Pittsburgh) n'est guère facile à appréhender, comme tout phénomène quantique. Un phénomène mécanique macroscopique permet pourtant d'illustrer, même imparfaitement, ce mécanisme d'oscillation perturbé par la matière, ainsi que l'avait brillamment fait le physicien américain Steven Weinberg : les pendules couplés. Deux pendules sont reliés par un ressort (supposé immatériel). Dans l'expérience classique, l'excitation du seul pendule de gauche se propage à celui de droite ; le premier pendule ralentit et cesse même d'osciller, puis il est à nouveau mis en mouvement alors que l'amplitude du second diminue et ainsi de suite. On voit l'énergie passer d'un pendule à l'autre : elle oscille. Un tel système a deux "états propres", celui dont les oscillations des deux pendules sont en phase (E_1), et le mode en opposition de phase (E_2) (figure).



Les neutrinos se propageant dans le vide sont aussi mieux décrits par leurs états propres, notés ν_1 et ν_2, ceux-ci étant dotés d'une masse (énergie) bien déterminée, m_1, et m_2. L'effet MSW se manifeste quand la propagation des neutrinos a lieu dans une matière dense dont la densité varie le long du chemin de propagation. Ceci peut modifier très fortement les oscillations observées dans le vide.
Dans l'analogie, les pendules ont maintenant un couplage que l'on peut faire varier. Un très fort couplage impose que la mise en mouvement de l'un des pendules entraîne immédiatement le second, c'est-à-dire l'excitation du mode E_1 (en phase). C'est la situation au centre du Soleil, où sont créés les neutrinos électroniques.
La raideur du ressort décroît : selon la rapidité de ce changement, l'état des pendules sera différent. La vitesse de la diminution de la raideur du ressort et la période des pendules doivent être proches pour que l'analogue de l'effet "MSW" dans les pendules couplés soit le plus efficace possible.
On aboutit finalement à un ressort si lâche qu'il ne joue plus son rôle de couplage, laissant chaque pendule osciller comme s'il était indépendant, mais en se souvenant du mode d'oscillation dicté par leur passé commun. Ces oscillations sans couplage sont l'analogue de la propagation des neutrinos dans le vide.
Les neutrinos solaires produits dans le centre du Soleil où la densité est de 150 g/cm^3 traversent des couches de matière dont la densité décroît presque exponentiellement ($\rho(R) = \rho_0 \cdot e^{-R/L}$), pour poursuivre leur voyage dans le vide vers la Terre. Si la longueur d'oscillation d'une espèce de neutrino à une autre, qui ne dépend que de $E_\nu/(m_1^2-m_2^2)$, est proche de la longueur L qui caractérise la diminution de la densité, l'effet MSW transforme quasiment un ν_e en un ν_2 à la sortie du Soleil.
Quand les neutrinos sont comptés dans les détecteurs sur Terre, seule la fraction de ν_e qui est contenue dans l'état propre ν_2 est recueillie.

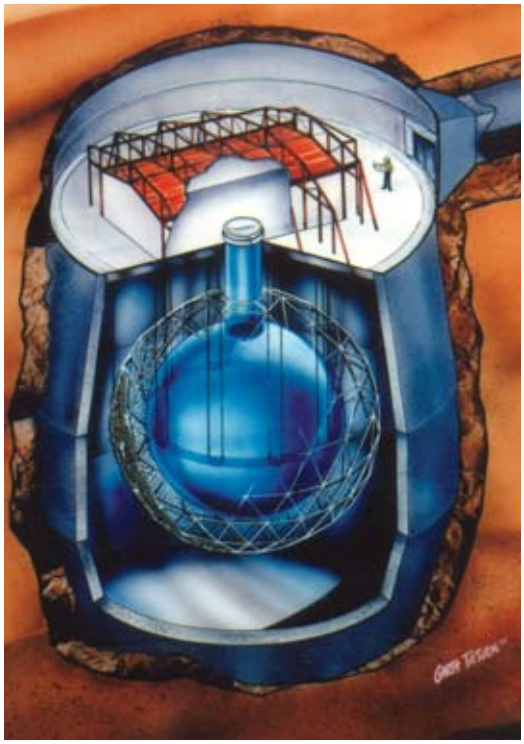
de 10 %. Le soleil artificiel a répondu aux attentes de ses concepteurs : le résultat de Gallex est validé et le déficit des neutrinos solaires, bien réel, ne peut être attribué à une faiblesse de l'expérience. Il reste à l'interpréter.

La nouvelle énigme

La réaction de fusion primordiale entre deux protons est intimement liée à la production d'énergie et à la luminosité du Soleil. Elle amorce l'ensemble des autres réactions nucléaires. Pour interpréter la composition du signal observé par Gallex, il faut commencer par prendre en compte ces neutrinos "primordiaux", principe d'économie en raison du caractère fondamental de la réaction pp. C'est pourquoi Gallex pourra légitimement prétendre avoir détecté pour la première fois les neutrinos solaires "primordiaux" du Soleil. C'est bien la fusion de deux protons en un deutérium qui permet aux étoiles de fonctionner ! Eu égard à la luminosité du Soleil, cette réaction explique déjà une très grande partie du signal de Gallex.
Les expériences chlore, Kamiokande, Gallex et Sage trouvent toutes un déficit important des neutrinos solaires. Au même moment, les développements de l'**héliosismologie** montrent que la compréhension du Soleil est bien maîtrisée par les astrophysiciens. Il semble qu'il faille chercher la solution de l'énigme ailleurs que dans le fonctionnement du Soleil. C'est la raison pour laquelle les chercheurs se tournent vers les propriétés des neutrinos.

Les oscillations des neutrinos et l'effet MSW

Parmi les douze briques élémentaires qui composent la matière, trois sont des neutrinos : le neutrino électronique ν_e, le neutrino muonique ν_μ, le neutrino tauique


SNO

Vue d'artiste du détecteur de l'Observatoire de neutrinos de Sudbury.

ν_τ (encadré C). Au sein du Soleil ne sont produits que des neutrinos électroniques. Les détecteurs de neutrinos solaires de l'époque n'étaient sensibles qu'à cette seule espèce. Si les ν_e fabriqués dans le Soleil se transforment en leurs cousins ν_μ ou ν_τ, les détecteurs compteront moins de neutrinos que prévu.
Or, si les neutrinos sont massifs, la théorie prévoit qu'ils ont la faculté "d'osciller" au cours du temps, c'est-à-dire qu'un neutrino originellement ν_e, peut, après avoir parcouru une certaine distance, se métamorphoser en ν_μ ou en ν_τ. Le terme d'oscillation se justifie par le fait que les ν_μ et les ν_τ sont capables à leur tour de se retransformer en ν_e. La probabilité du phénomène dépend d'un certain nombre de caractéristiques des neutrinos, en particulier leur énergie et leur masse. En 1986, cette possibilité théorique est renforcée par la découverte de l'effet MSW (encadré 2). Cet effet prend en compte le voyage des neutrinos au sein même de la matière solaire, où peuvent avoir lieu des phénomènes d'amplification des oscillations. Il s'agit d'une solution très plausible au problème des neutrinos solaires, qui explique simultanément les divers déficits observés. Les expériences sont en effet sensibles à des neutrinos d'énergie différente, qui ne sont pas affectés de la même manière par les phénomènes d'oscillation. Quelle est celle qui est apte à apporter la preuve irréfutable que le mécanisme d'oscillation des neutrinos est vraiment à l'œuvre dans le Soleil ? Trois conséquences de l'effet MSW sont spécifiques et spectaculaires : la présence des autres espèces de neutrinos venant du Soleil (l'effet MSW transforme les ν_e en ν_μ ou en ν_τ, qu'aucune réaction nucléaire dans le Soleil ne peut produire), la déformation éventuelle du spectre en énergie des neutrinos du bore et l'effet jour-nuit, où paradoxalement le Soleil "brille" plus fort en ν_e (neutrino électronique) la nuit que le jour.

L'expérience SNO détecte les saveurs

Il devient alors de plus en plus évident qu'une partie des neutrinos solaires prend bien les habits des autres membres de la famille, devenant ainsi indétectables. Le phénomène d'oscillation imaginé par les théoriciens a bien un sens. Reste à le mettre clairement en évidence. Une expérience est montée au Canada pour tester cette hypothèse.
L'Observatoire de neutrinos de Sudbury (SNO) est construit à plus de deux kilomètres sous terre, dans une mine de nickel près de Sudbury (Ontario). Dans une cavité de 22 mètres de diamètre et de 34 mètres de haut, le détecteur est composé de 1 000 tonnes d'eau lourde[3] enfermées dans un récipient de plastique acrylique entouré d'eau ordinaire ultrapure. Pas moins de 9 600 détecteurs décèlent dans ce volume les petits jets de lumière produits par l'arrêt ou la dispersion des neutrinos.
Employant l'eau lourde, l'expérience est capable de mesurer le nombre de neutrinos électroniques générés dans le noyau du Soleil qui atteignent la Terre, comme les expériences précédentes, mais elle peut aussi évaluer de façon indépendante le nombre total de neutrinos (figure 3). Cette fonction exceptionnelle permet de déterminer si les neutrinos créés dans le noyau du Soleil se métamorphosent pendant leur voyage jusqu'à la Terre. En mai 2001, SNO confirme une nouvelle fois le déficit des neutrinos électroniques constaté. De plus, grâce aux réactions spécifiques sur les atomes de deutérium de la cible, il lui est possible de détecter les trois **saveurs** de neutrinos par l'intermédiaire d'une réaction dite à "**courant neutre**". Les résultats sont impressionnants : les trois saveurs de neutrinos en provenance du Soleil sont détectées, conformément à ce qui est attendu en cas d'oscillation. Ils établissent irréfutablement que les neutrinos solaires électroniques se transforment spontanément en neutrinos muoniques et tauiques au cours de leur périple entre Soleil et Terre.

(3) Eau lourde : eau dans laquelle l'hydrogène (^{1}H) est remplacé par son isotope **deutérium** (^{2}H).

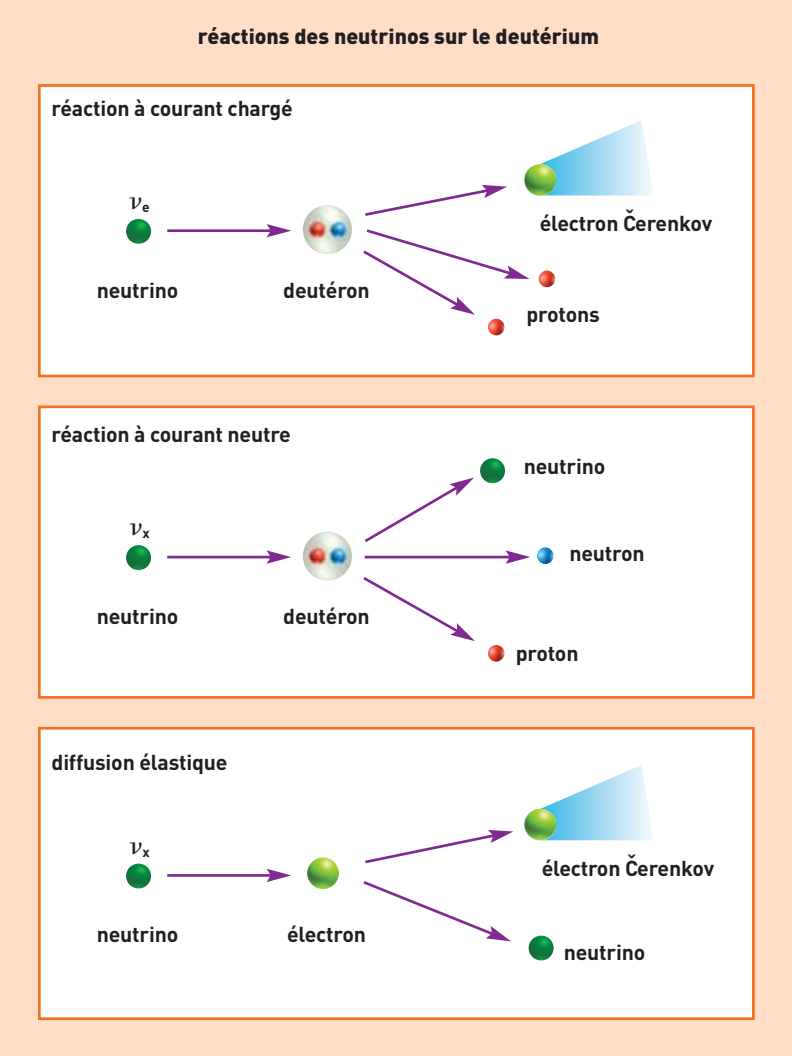
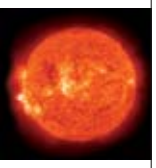


Figure 3.
Les réactions utilisées dans l'Observatoire de neutrinos de Sudbury (SNO). La première donne le spectre énergétique des seuls neutrinos électroniques, la deuxième permet de mesurer le flux total de neutrinos solaires issus de la désintégration du bore 8, la troisième, sensible aux trois types de neutrino mais surtout aux neutrinos électroniques, offre une forte sensibilité directionnelle. N.B. : la taille des neutrinos et des électrons a été considérablement exagérée par rapport à celle des protons, des neutrons et des deutérons (noyaux d'atomes de deutérium).

La fin de l'énigme

En septembre 2003, la même expérience affine sa mesure du flux total de neutrinos en provenance du Soleil. L'ajout de sel ordinaire (NaCl) très pur dans l'eau



lourde a augmenté sa sensibilité aux autres espèces de neutrinos. Le résultat, étonnamment précis, est que le flux de toutes les saveurs de neutrinos arrivant sur Terre coïncide à moins de 15 % près avec celui prédit par les modèles du Soleil pour les neutrinos du bore. Après cette expérience, il n'y a plus d'énigme des neutrinos solaires. Ceux qui manquent dans une espèce se retrouvent bien dans les autres et le nombre total de neutrinos, toutes espèces confondues, est en très bon accord avec les prédictions de la machinerie solaire faites plus de trente ans auparavant. Quelques ambiguïtés sur les masses des neutrinos restaient néanmoins à lever.

L'expérience KamLAND confirme

Un dernier résultat, en provenance à nouveau du Japon, va lever ces dernières ambiguïtés. L'expérience KamLAND est un détecteur enterré constitué d'un millier de tonnes de liquide scintillant[4]. Elle ne compte pas les neutrinos solaires (pour l'instant du moins), mais les **antineutrinos** émis par les réacteurs nucléaires japonais, situés à une distance moyenne de 180 km.
En décembre 2002, le résultat des 142 premiers jours de comptage n'a qu'une alternative : afficher soit 85 détections, pour des neutrinos dépourvus de masse et n'oscillant pas, soit beaucoup moins pour des neutrinos légèrement massifs et ainsi capables de se métamorphoser d'une espèce en une autre comme cela a été observé dans les expériences de neutrinos solaires. L'expérience dénombre 52 interactions, résultat coïncidant avec l'une des solutions possibles d'oscillations, et précisant très fortement les paramètres de masses des neutrinos.

Hans Mehlin/The Nobel Foundation

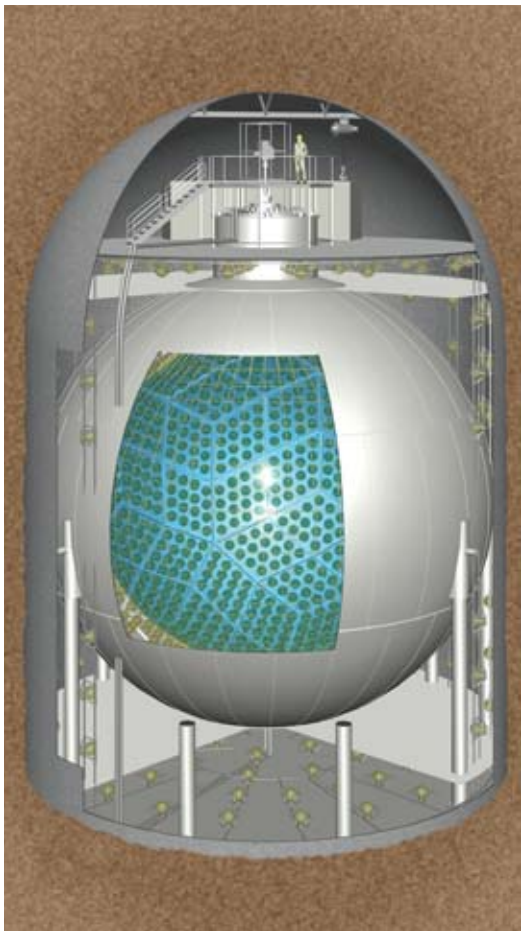
Remise du prix Nobel de physique 2002 par le roi de Suède à Raymond Davis. Masatoshi Koshiba et Riccardo Giacconi, ses co-lauréats, figurent au premier rang de l'assistance, à gauche.

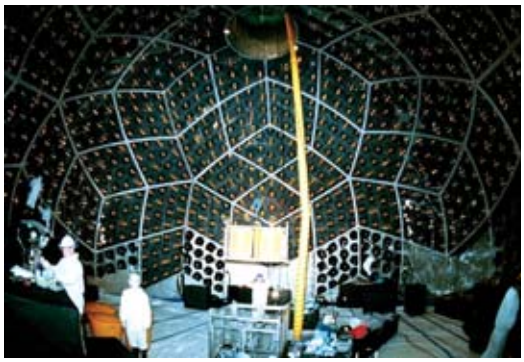
Pourquoi cette légèreté ?

Dénouement heureux de cette belle histoire, c'est avec une joie partagée qu'en octobre 2002 la petite communauté des neutrinos solaires apprend l'attribution du prix Nobel de physique à Raymond Davis et Masatoshi Koshiba, les deux pionniers de cette exploration, couronnant près de quarante ans de recherches.
Ainsi, après ces expériences incroyablement subtiles sur tous les continents, après des calculs théoriques mêlant les connaissances dans toutes les branches de la physique, grâce à des collaborations fructueuses et à de saines émulations entre scientifiques parlant des langues différentes mais motivés par un but commun, un impressionnant bilan peut être dressé :

- les neutrinos créés lors des réactions au cœur du Soleil sont bien observés sur Terre. C'est la preuve directe que les physiciens comprennent bien comment la fusion nucléaire de l'hydrogène peut être la source d'énergie du Soleil et des étoiles de la **séquence principale** qui lui ressemblent ;
- les modèles solaires expliquent et reproduisent avec précision toutes les observations sur le Soleil, tant les différents modes d'oscillations acoustiques mesurés en surface que les neutrinos les plus énergétiques, mais aussi les plus marginaux dans la production d'énergie du Soleil. La température au centre du Soleil est aujourd'hui connue à mieux que 0,5 % près !
- une certitude a été acquise : les neutrinos oscillent, se transforment d'une espèce en une autre ; ce qui ne peut se produire que si ces particules sont massives, contrairement à l'hypothèse préexistante.

Mais voilà qu'un nouveau mystère apparaît : pourquoi les neutrinos sont-ils si légers par rapport aux neuf autres particules fondamentales de matière ? Quel mécanisme théorique peut être invoqué pour leur attribuer cette masse ? Quelle fenêtre cette infime masse des neutrinos est-elle en train d'entrebâiller ?





KamLAND/Stanford University

Maquette (en haut) de l'ensemble du détecteur de l'expérience KamLAND. En bas, vue de l'intérieur du détecteur durant l'installation des tubes photomultiplicateurs.

(4) Liquide scintillant : liquide organique contenant des noyaux benzéniques qu'excite une particule chargée électriquement lorsqu'elle traverse ce liquide. Ces noyaux émettent alors des photons qui visualisent le passage de la particule et dont le nombre renseigne sur son énergie.

> **Michel Cribier**
Direction des sciences de la matière
CEA centre de Saclay

A Toute la lumière sur le Soleil

Plus gros objet du système solaire, le Soleil représente environ 99,8 % de sa masse totale. Composé initialement de plus de 70 % d'hydrogène et plus de 25 % d'hélium, le Soleil est une gigantesque boule de gaz chaud tournant sur elle-même.

La structure interne du Soleil est divisée en quatre régions (figure). Le cœur, où les conditions de température et de densité sont extrêmes, est le siège de nombreuses réactions nucléaires qui transforment l'hydrogène en hélium. L'énergie libérée se retrouvera sous la forme de lumière visible au niveau de la surface.

Dans la zone radiative, qui s'étend du cœur à 0,71 rayon solaire, l'énergie est transportée vers la surface du Soleil par l'interaction photons-matière (transport radiatif). Les photons sont absorbés et réémis des millions de fois dans de multiples collisions avec les atomes rencontrés qui sont très ionisés. Il faut plus d'un million d'années pour que les photons atteignent la tachocline, fine couche de transition entre la zone radiative et la zone convective et qui joue un rôle essentiel dans le champ magnétique solaire.

Dans la zone convective, du fait de la diminution de température, le milieu formé d'atomes partiellement ionisés et d'atomes neutres est plus opaque. La progression des photons devient difficile. De plus, la densité y varie d'un facteur un million entre la base et la surface. Ces forts gradients de température et de densité engendrent des mouvements convectifs qui sont observables à la surface comme des granules (leur durée de vie se chiffre en minutes) ou des supergranules dont les dimensions sont respectivement de l'ordre de 1 000 km et 35 000 km.

L'atmosphère solaire comporte quatre régions (figure). La surface, ou photosphère, épaisse de seulement 400 km et dont la température est proche de 5 800 K, présente donc un aspect granuleux et des zones plus ou moins sombres. Des zones obscures ou taches solaires, qui sont isolées ou en groupe, sont à une température de 3 800 K. Elles apparaissent noires du fait de leur différence de température avec les régions avoisinantes. Elles sont soumises à un cycle de 11 ans et sont associées à des régions dont le champ magnétique est beaucoup plus intense (quelques milliers de gauss) que sur l'ensemble du Soleil (1 gauss). Ces taches peuvent atteindre un diamètre de 50 000 km. Leur durée varie de quelques jours à plusieurs mois. Des zones plus claires et plus chaudes ou facules, parfois isolées mais généralement situées autour d'un groupe de taches, sont également observées.

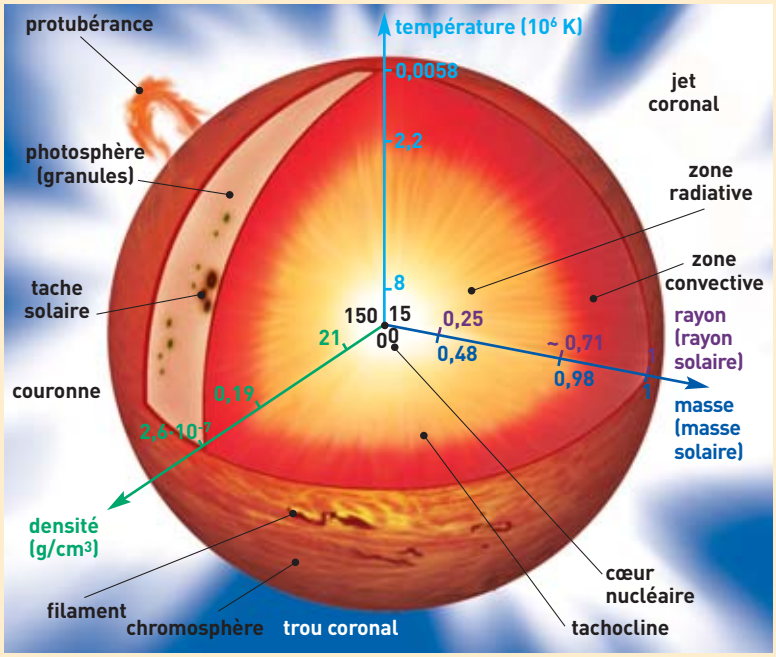


Figure.

Au-delà de la photosphère, s'étendant sur des milliers de kilomètres, se trouve la chromosphère, dont la densité continue à décroître rapidement alors que la température atteint 20 000 K. Dans cette zone se trouvent les plages, régions brillantes caractérisant les forts champs magnétiques des taches solaires, les protubérances ou filaments (lorsqu'elles sont vues sur le disque solaire), structures magnétiques plus denses et plus froides (10 000 K) que leur environnement, et les spicules, petits jets de matière à vie courte (5 à 10 minutes) se dirigeant vers la couronne à une vitesse de près de 20 km/s.

Entre la chromosphère et la couronne se situe la région de transition, couche mince et irrégulière dans laquelle la température augmente brutalement.

La couronne, peu riche en gaz, s'étend sur des millions de kilomètres et est caractérisée par une température de plus de 1 500 000 K et une densité faible. Elle comporte de nombreuses structures magnétiques ou associées à des structures magnétiques telles que les boucles coronales, les trous coronaux, les points brillants... Dans cette région en perpétuelle évolution apparaissent les protubérances ou filaments, sous la forme de grands panaches de gaz chauds, provenant de la chromosphère.

L'activité solaire n'est pas constante. Régulièrement, avec une intensité cyclique, des éruptions violentes se produisent dans les régions actives. Il s'agit de brusques libérations de particules de haute énergie dans le milieu interplanétaire. Ces éjections de masse coronale (CME) atteignent parfois 100 000 km de haut et 200 000 km de long. Suivant la direction d'éjection, les particules de haute énergie émises peuvent interagir avec l'atmosphère terrestre.

Le Soleil expulse également un flux permanent de particules chargées, principalement des protons et des électrons formant un plasma, appelé vent solaire. Celui-ci se propage hors du système solaire à une vitesse d'environ 450 km/s. Le Soleil perd environ un cent millième de milliardième de sa masse par an.

Les réactions nucléaires solaires

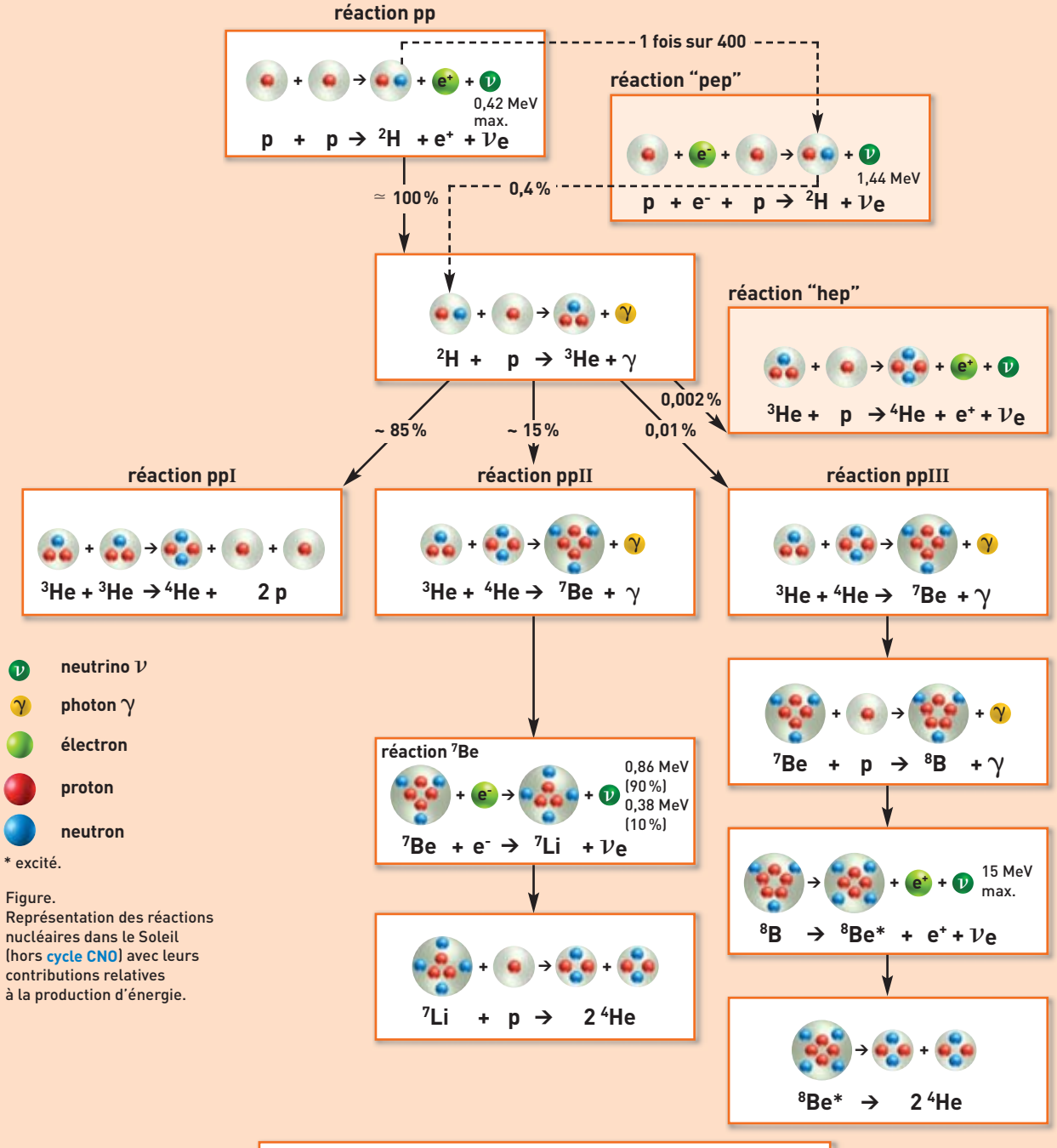


Figure.
Représentation des réactions nucléaires dans le Soleil (hors cycle CNO) avec leurs contributions relatives à la production d'énergie.

$$4\,p + 2e^- \rightarrow {}^4He + 2\,\nu_e + 27\ MeV^{(1)}$$

(1) Il s'agit d'une énergie moyenne.

Les réactions nucléaires débutent par la fusion de deux **protons** et se terminent par la production d'**hélium** 4, l'une *via* l'hélium 3, l'autre *via* le béryllium 7, suivie selon les cas de celle d'autres éléments légers (lithium 7 ou béryllium 8 *via* le bore 8). Ces chaînes de réactions proton-proton portent les noms de ppI, ppII et ppIII (figure).

Dans la première réaction de base, l'un des deux protons se transforme en **neutron** par le biais de l'**interaction faible**. Les deux particules jointes donnent naissance à une variété d'hydrogène, le **deutérium** (D ou ^2H), formé donc d'un proton et d'un neutron : en même temps un anti-électron ou **positon** et un **neutrino** (électronique) de basse énergie s'envolent.

Le deutérium capture un proton pour former un **noyau** d'hélium 3 et un **photon gamma**. Deux hélium 3 réagissent pour produire un hélium 4 en libérant deux protons, renvoyés en début de chaîne. Dans quelque 85 % des cas, ainsi se termine la **chaîne ppI**. Cette chaîne est riche en neutrinos : 65 milliards d'entre eux traversent chaque cm^2 de notre peau à chaque seconde. Mais ceux-ci, de basse énergie, sont difficiles à mettre en évidence. Il a fallu toute la sensibilité du détecteur Gallex et de ses semblables pour les enregistrer (voir *Les neutrinos solaires, une énigme enfin résolue*).

Dans les 15 % de cas restants, un hélium 3 fusionne avec un hélium 4 pour produire un béryllium 7 et un photon gamma. Soit le béryllium 7 devient lithium 7 par capture d'un électron, ce lithium 7 capturant un proton pour donner deux hélium 4 directement (**ppII**), soit, en capturant un proton, il parvient indirectement au même résultat par le truchement du bore 8, qui se désintègre avec émission d'un neutrino énergétique en béryllium 8, lequel se brise aussitôt en deux hélium 4 (**ppIII**). Au bout de la chaîne ppIII se produit donc la désintégration du bore 8 en béryllium 8, dispensatrice de neutrinos de haute énergie, très prisés des chasseurs de neutrinos solaires.

Les taux de réactions dans le **plasma** solaire doivent être corrigés de l'effet d'écran des **électrons libres** (voir *Vision statique et dynamique de l'intérieur solaire*).

L'énergie engendrée sous forme de **rayons gamma** sert à maintenir chaude la chaudière solaire, ce qui lui évite de s'effondrer, et à la faire briller. L'énergie, sous forme de **photons**, filtre vers la surface. Elle est diffusée, absorbée, réémise par les **ions** et les **électrons**. Seuls les neutrinos traversent en droite ligne le Soleil, en deux secondes environ.