

Le Soleil observé à la longueur d'onde de 304 angströms par l'instrument *Extreme ultraviolet Imaging Telescope* embarqué sur le satellite SOHO. L'émission dans cette région du spectre montre la partie supérieure de la chromosphère, d'une température de l'ordre de 60 000 kelvins, et des protubérances dont certaines peuvent atteindre comme ici des altitudes se chiffrant en centaines de milliers de kilomètres.

SOHO (ESA/NASA)

I. COMPRENDRE L'ASTRE SOLEIL

Même si nous savons à présent que la Soleil n'est pas le centre de l'Univers, mais une étoile fort banale, nous voulons comprendre comment il est né, comment il fonctionne. N'est-ce pas lui qui a permis la formation de la Terre et l'éclosion de la vie ? Ne sommes-nous pas des enfants du Soleil ?

Or notre compréhension de l'astre a fait d'énormes progrès ces dernières années.

La principale raison ? L'émergence d'une méthode extrêmement puissante, l'héliosismologie. Cette technique, décrite ici par Sébastien Couvidat et Rafael García, consiste à sonder l'intérieur du Soleil au moyen des ondes acoustiques observées à la surface, et d'obtenir ainsi les profils de la vitesse du son, de la densité et même de la rotation, en fonction de la profondeur. Depuis huit ans, trois instruments placés sur le satellite SOHO, dont un construit en collaboration avec le CEA, traquent le Soleil en permanence, épaulés par des réseaux au sol, eux aussi fruits de vastes collaborations internationales. À l'aide de ce diagnostic, nous sommes passés de la spéculation – certes guidée par l'intuition physique – à la construction de modèles bien plus fiables, ainsi que le démontre Sylvaine Turck-Chièze. Ces modèles sismiques ont atteint une telle précision qu'ils laissaient une seule explication pour le déficit de neutrinos solaires constaté au niveau de la Terre, à savoir que le neutrino recelait une propriété non prévue par la théorie standard. Michel Cribier explique comment cette propriété a été découverte, mettant un terme à un long débat entre astrophysiciens et physiciens des particules : contrairement à ce qui était admis jusqu'ici, le neutrino possède une masse, et il oscille entre deux états, dont un seul est détecté par nos instruments. En tenant compte de cet effet, le flux de neutrinos mesuré est en excellent accord avec les modèles solaires sismiques les plus récents. La modélisation du Soleil vient de franchir un autre pas important, grâce à la puissance de calcul toujours croissante des super-ordinateurs : en devenant tridimensionnelle, et en atteignant une résolution suffisamment élevée, elle permet maintenant de décrire les mouvements turbulents qui se produisent dans la zone convective. Les simulations numériques présentées par Allan Sacha Brun font enfin comprendre pourquoi le Soleil tourne plus rapidement à l'équateur qu'aux pôles. Et laissent espérer une prochaine élucidation du mécanisme dynamo à l'origine du champ magnétique solaire, responsable des multiples facettes de son activité.

Nul ne s'étonnera de voir des équipes du CEA fortement impliquées dans la recherche solaire et contribuer activement à lui donner une impulsion nouvelle. Car comment le CEA, dont une priorité est la maîtrise de la fusion, pourrait-il se désintéresser de ce "réacteur thermonucléaire à confinement gravitationnel", pour reprendre la belle formule utilisée par Michel Cassé ?

> **Jean-Paul Zahn**
Observatoire de Paris



Les chercheurs en ont plus appris sur le Soleil en cent ans qu'en deux mille. Les données à son sujet se sont accumulées ces dernières années, confirmant que le fonctionnement de ce réacteur thermonucléaire à confinement gravitationnel opérant la fusion des noyaux d'atomes tient principalement en trois chaînes de réactions.

Soleil nucléaire

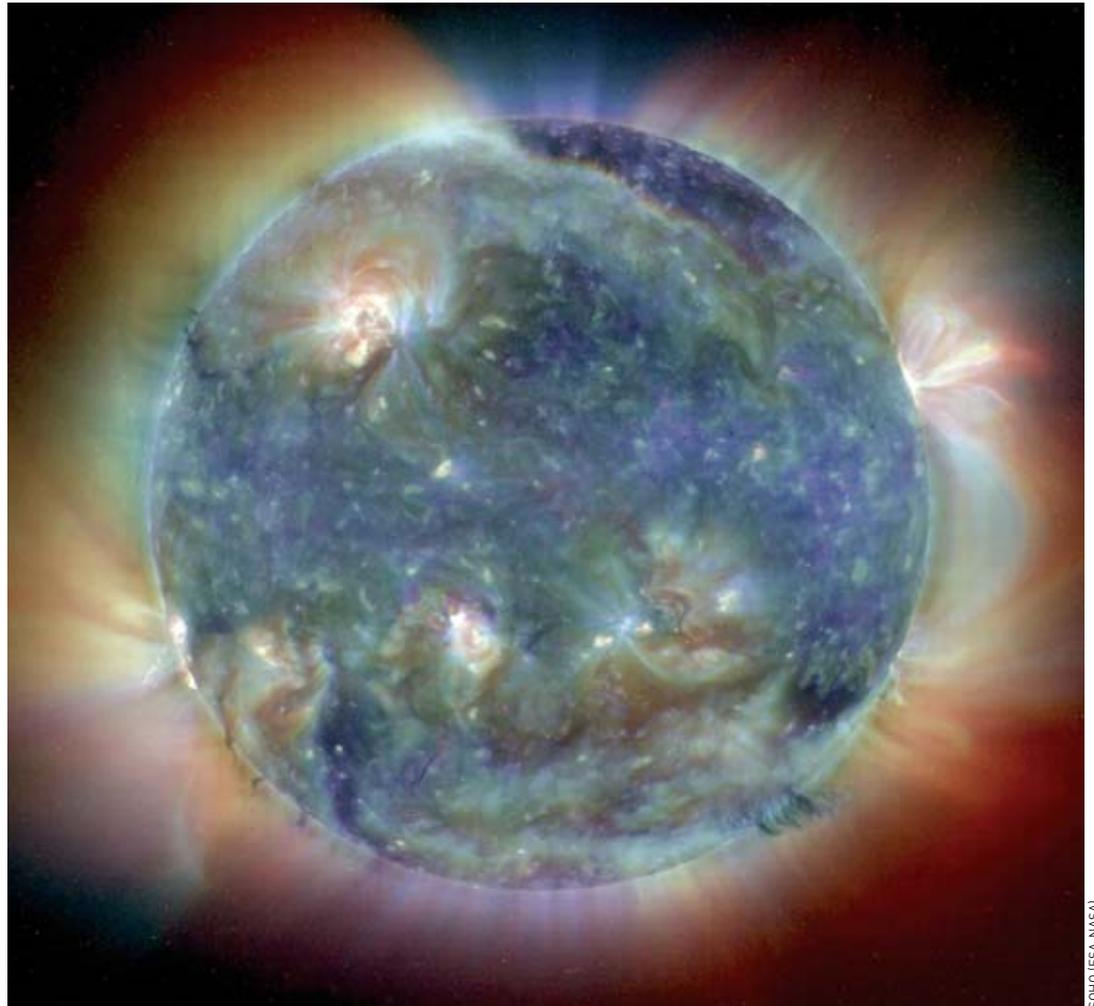


Image composite du Soleil dans trois longueurs d'onde (171 angströms pour le bleu, 195 Å pour le jaune et 284 Å pour le rouge) réalisée dans l'ultraviolet à partir des données de l'instrument EIT (*Extreme ultraviolet Imaging Telescope*) du satellite européen-américain SOHO.

SOHO (ESA-NASA)

Carte d'identité du Soleil

distance à la Terre	150 millions de km
distance au centre galactique	30 000 années-lumière
type spectral	G2 V
âge	4,6 milliards d'années
rayon	700 000 km
température de surface	5800 degrés
masse	$2 \cdot 10^{30}$ kg
luminosité	$4 \cdot 10^{33}$ erg/s
génération d'énergie moyenne	2 erg/g par seconde
densité moyenne	$\sim 1,4$ g/cm ³
température centrale	15 millions de degrés
densité centrale	150 g/cm ³
composition initiale	hydrogène 70,5%, hélium 27,2%, ensemble des autres éléments (carbone, azote, oxygène, fer et tous les éléments lourds) environ 2%

Tableau.
Les principales caractéristiques du Soleil.

Il y a 4,6 milliards d'années, dans la morne et lointaine banlieue d'une **galaxie** banale, un nuage interstellaire quelconque allait donner naissance à une **étoile**, parmi tant d'autres, laquelle allait s'entourer de planètes, et sur l'une de ces planètes allait émerger la vie et la conscience. Lorsque cette conscience s'éleva au point de différencier le jour et la nuit, l'étoile nommée Soleil devint source de mythe, puis de science. Il fallut beaucoup de temps pour réaliser que Soleil et Terre sont faits de la même substance et sont régentés par les mêmes lois physiques. Le Soleil est un astre physique, donc il est intelligible. Et sa compréhension a plus progressé en cent ans qu'en deux mille. Que peut-on dire de plus profond et de plus juste à son sujet?

Le Soleil, crucial pour la destinée humaine, n'est qu'une étoile moyenne, de la majorité silencieuse parmi les centaines de milliards de milliards qui peuplent l'univers observable. Banale certes, mais c'est *notre*

Figure 1.
Le Soleil se situe au cœur de la **séquence principale** du diagramme de Hertzsprung-Russell. Les étoiles sont classées, des plus chaudes aux plus froides, en fonction des **raies spectrales** qui permettent d'estimer la température de leur surface. Leur désignation comporte une lettre (dans la série O, B, A, F, G, K, et M) et un chiffre, qui correspond à une subdivision de la catégorie principale, suivis d'un nombre romain qui désigne sa classe de luminosité. Le Soleil est ainsi de type G2 V, une *naine jaune* d'âge moyen.

étoile (tableau). Étant donné sa proximité, elle a été et reste un objet d'études extensives, tant du point de vue de l'observation que de la théorie, si bien qu'elle est aujourd'hui considérée comme l'étoile de référence de l'astrophysique (encadré A, *Toute la lumière sur le Soleil*, p. 13). C'est, pour l'astronome conventionnel, une étoile de type G2 V, sur la **séquence principale** qui barre le diagramme température/luminosité où se concentrent les étoiles qui, comme le Soleil, brûlent l'**hydrogène** pour en faire de l'**hélium** (figure 1). Le Soleil n'est donc pas un astre isolé; il appartient à une société d'étoiles, une communauté d'astres et de nuages interstellaires. Au cours des cinq derniers milliards d'années, notre étoile a été immergée dans une région de l'espace de très basse densité, une bulle entre le bras d'Orion et l'éperon (excroissance) du bras galactique local. Notre environnement galactique change au fil du temps car le Soleil (et son cortège de planètes) se meut à travers l'espace à une vitesse de 54 années-lumière par milliard d'années⁽¹⁾. De surcroît, il oscille par rapport au plan galactique avec une période de 66 millions d'années.

Soleil vrai

L'astre du jour est un réacteur nucléaire à **confinement gravitationnel** qui fonctionne sur le mode de la **fusion** (voir le chapitre II). En cela il suscite l'intérêt particulier du CEA. Toute la physique est convoquée pour peindre l'image évolutive d'un astre intégral, depuis son centre fertile jusqu'à sa **couronne** chaude. Physique atomique, pour comprendre l'interaction rayonnement-matière; physique nucléaire, pour déterminer la source d'énergie du Soleil; physique des particules, pour en détecter les **neutrinos** messagers; physique des **plasmas**, pour en étudier la gestion intime, simulation numérique, pour en révéler la structure interne et retracer la carrière depuis sa naissance nuageuse jusqu'à sa reconfiguration finale en *naine blanche* (voir l'encadré 2).

Soleil opaque et Soleil transparent

Le Soleil se divise en deux zones distinctes, la **région opaque**, qui laisse difficilement filtrer la lumière, que l'œil ne pénètre pas et qui ne peut donc être abordée

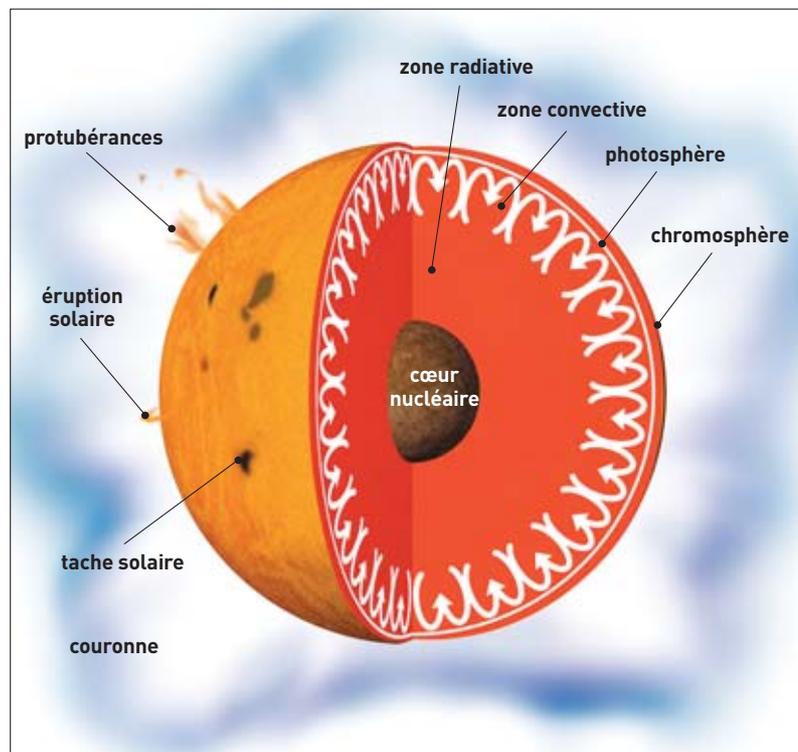
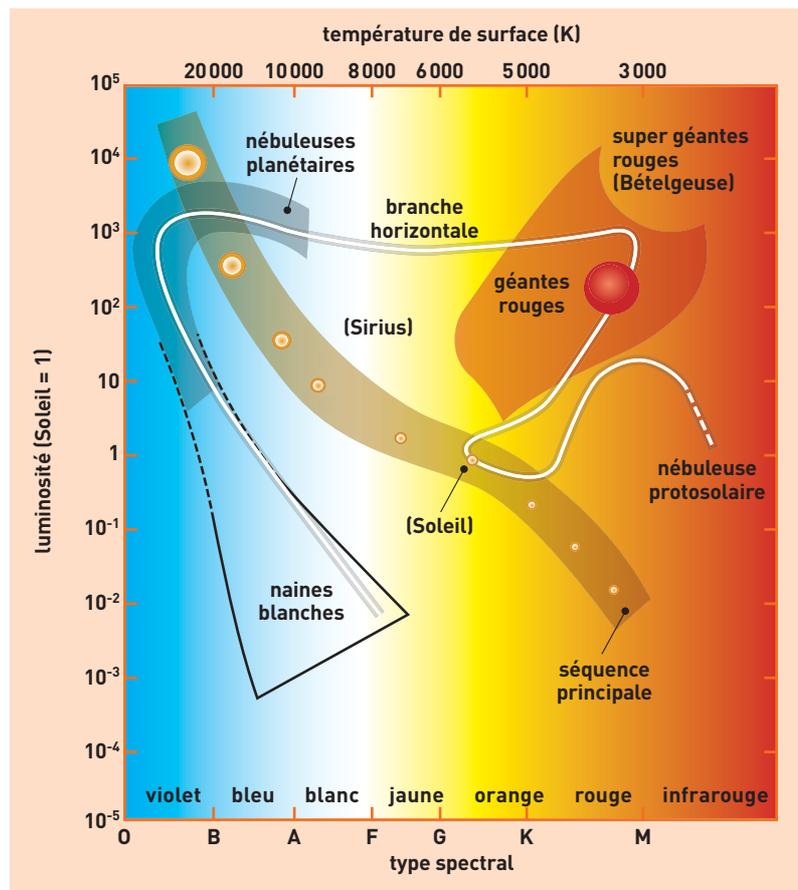
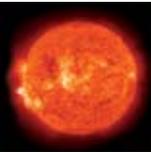


Figure 2.
Schéma simplifié des principales zones solaires.

(1) Soit une vitesse de 16,2 m/s par rapport à l'environnement local, dans la direction de latitude et longitude galactiques $l = 53^\circ, b = +25^\circ$. Une année-lumière est la distance parcourue en un an par la lumière (à la vitesse de 299 792,458 km/s dans le vide), soit 9 460,53 milliards de kilomètres ou 63 239 unités astronomiques.

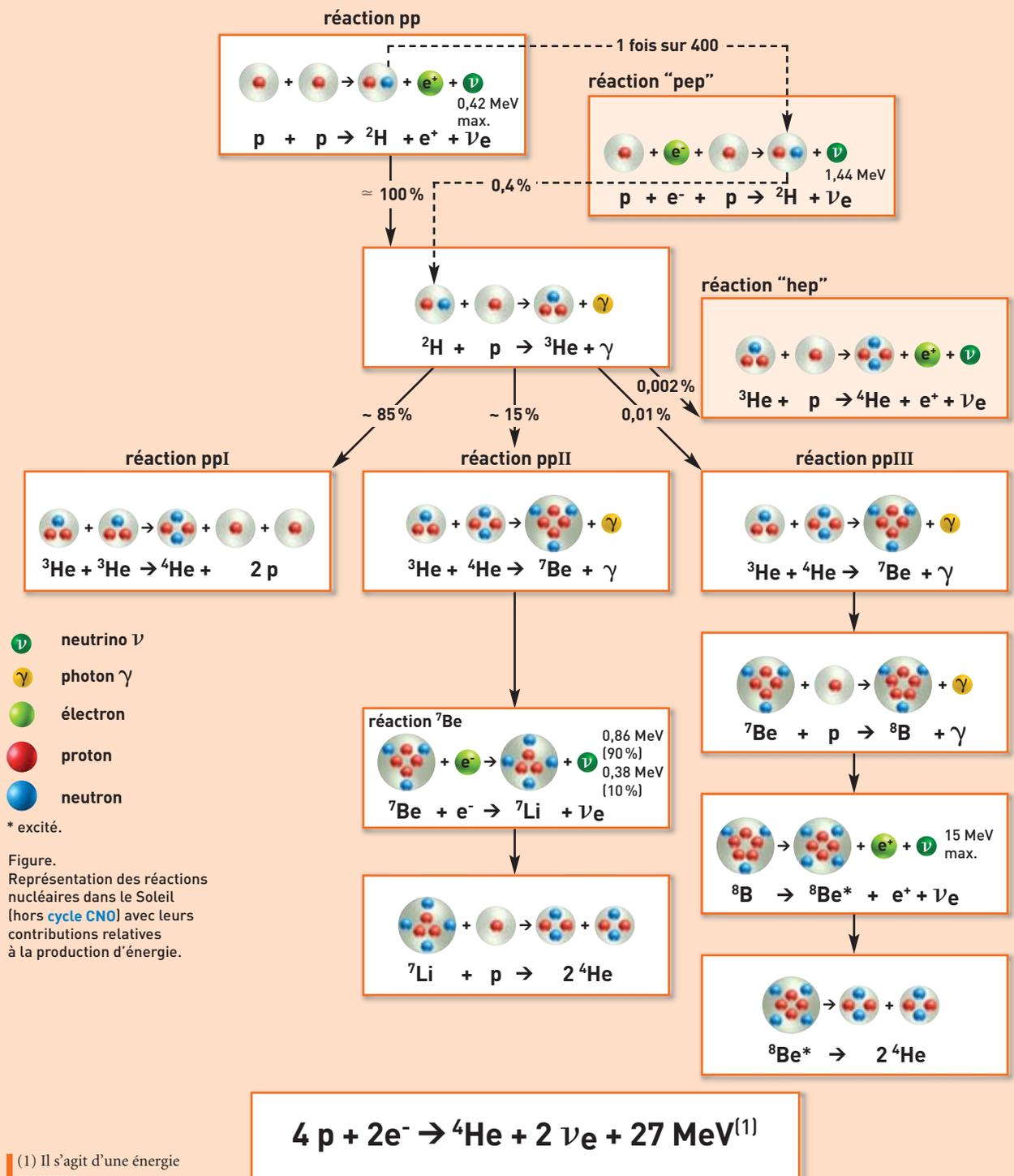


que par le calcul, et la *zone transparente*, qui laisse filtrer des messages perceptibles⁽²⁾. La **photosphère** (étymologiquement : sphère de **lumière visible**) marque la frontière entre Soleil opaque et Soleil transparent (figure 2). Sa composition, analysée au moyen de la **spectroscopie** (encadré B, *Des spectres qui en disent long*, p. 17), porte témoignage de celle du nuage-père du Soleil et de ses planètes, à quelques

détails près. Cette composition de surface n'a été que très légèrement modifiée depuis que l'astre du jour existe, car les réactions nucléaires ne l'ont pas atteinte. Elle est donc celle du Soleil originel, ou plus exactement du nuage qui lui a donné naissance. À son tour, ce nuage reflète la composition de la banlieue de la galaxie, telle qu'elle était il y a 4,6 milliards d'années. Sachant que l'âge de la Voie lactée est d'environ 10 milliards d'années, plusieurs générations d'étoiles se sont succédé avant que le Soleil ne naisse, chacune versant son obole d'atomes complexes (carbone, azote,

(2) En vérité, les neutrinos bouleversent cette division, car pour eux l'étoile est transparente de fond en comble.

Les réactions nucléaires solaires



(1) Il s'agit d'une énergie moyenne.

oxygène..., fer) par **supernovae** interposées. Le Soleil a donc hérité de l'œuvre nucléaire de ses aïeules. La teneur en éléments variés, obtenue en croisant les études de composition photosphérique et météoritique, montre une insolente domination de l'*hydrogène*, l'élément premier, issu du **big bang** (tableau p. 6).

$E = mc^2$, le Soleil brille !

Quelles sont les réactions nucléaires qui dans les conditions requises de température et de densité (15 millions

1

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*).

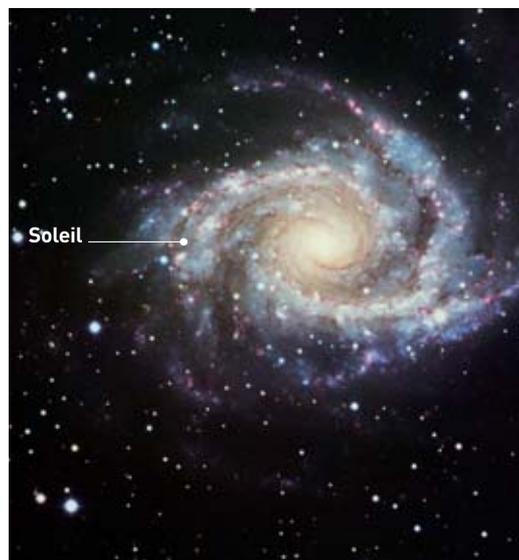
Dans les 15% de cas restants, un hélium 3 fusionne avec un hélium 4 pour produire un béryllium 7 et un photon gamma. Soit le béryllium 7 devient lithium 7 par capture d'un électron, ce lithium 7 capturant un proton pour donner deux hélium 4 directement (**ppII**), soit, en capturant un proton, il parvient 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.

de degrés, 150 g/cm^3) sont susceptibles d'entraîner la réaction de l'hydrogène avec lui-même? Cette brûlante énigme n'a été résolue qu'au vingtième siècle, après que la mécanique quantique eut assoupli les diktats de la physique conventionnelle classique. L'**effet tunnel**, autorisé et même rendu inéluctable par la nature ondulatoire des entités quantiques, est une nécessité absolue pour expliquer le fait que le Soleil brille, au même titre que la relativité ($E = mc^2$). Le Soleil est un astre **relativiste** et quantique.

En 1939, le physicien américain d'origine allemande Hans Bethe décrit dans un article qui fera date deux mécanismes de **fusion thermonucléaire** par lesquels les étoiles de la séquence principale, comme le Soleil, produisent l'énergie correspondant à leur luminosité observée. Ces deux mécanismes sont répertoriés sous



Anglo-Australian Observatory/David Malin Images

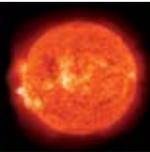
Sur cette image de la galaxie spirale NGC 2997 est indiquée la position d'une étoile correspondant à celle que le Soleil occupe dans la Voie lactée, une galaxie du même type.

l'appellation chaîne proton-proton (chaîne pp) (encadré 1) et **cycle CNO** (carbone-azote-oxygène). Dans les deux types de réaction, la source d'énergie de base est la fusion de quatre **protons** (noyau d'hydrogène) formant un **noyau** d'hélium. Seulement il ne suffit pas que quatre protons se réunissent, deux par deux par exemple, car ils forment une entité instable. En outre, dans l'intervalle et à deux reprises, un proton se transforme en **neutron**. Mais les physiciens nucléaires savent, pour l'avoir mille fois observé, que, chaque fois qu'un proton se transforme en neutron, s'envole un neutrino. Ils en concluent très vite que le Soleil est nécessairement une source copieuse de neutrinos.

Au fil des années, des mesures de laboratoire de plus en plus précises (nécessitant des accélérateurs de protons et de noyaux) de réactions nucléaires de fusion associées à des modèles théoriques délicats ont conduit à inférer que le Soleil brille essentiellement par le biais de la chaîne pp et non du cycle CNO⁽³⁾.

Le **cœur** du Soleil est un réacteur stabilisé et auto-contrôlé. L'énergie y est produite par la conversion nucléaire de l'hydrogène en hélium. Les quatre protons ayant une masse supérieure à celle du noyau d'hélium

(3) Actuellement, les calculs impliquent que 98,5 % de la luminosité solaire sont dispensés par la chaîne pp.



de 0,7%, ce défaut de masse se retrouve dans l'énergie du rayonnement. C'est ainsi que le Soleil brille. L'équation nucléaire fondamentale de son fonctionnement s'écrit: $4 p \rightarrow He + 2 e^+ + 2 \nu_e$ (4). Le Soleil brûle, au sens nucléaire du terme, l'hydrogène originel provenant du big bang. Un **combustible** vétuste mais efficace, puisque 1 gramme d'hydrogène produit $6,6 \cdot 10^{18}$ **ergs**, ce qui en fait un combustible des millions de fois plus énergétique que le pétrole (alors que sa combustion chimique dégage 2,6 fois plus d'énergie que ce dernier).

Croisement des forces dans le Soleil

Revenons à la mécanique intime des astres, à l'astrophysique la plus fondamentale. Les quatre forces (**gravitationnelle**, **électromagnétique**, **forte** et **faible**; voir l'encadré C, *Particules élémentaires et interactions fondamentales*, p. 38) se croisent dans le Soleil et s'y harmonisent. Les interactions nucléaires forte et faible ont pour fruit la fusion thermonucléaire, dispensatrice d'énergie. L'interaction faible, ou plutôt lente, donne à l'astre sa grande longévité. L'interaction électromagnétique modère les réactions nucléaires en érigeant une barrière de potentiel **électrostatique** entre les particules chargées d'électricité. Cette même interaction est responsable du défaut de transparence de la substance solaire. Sans cette quasi-opacité, le Soleil se viderait instantanément de son énergie(5). Quant à

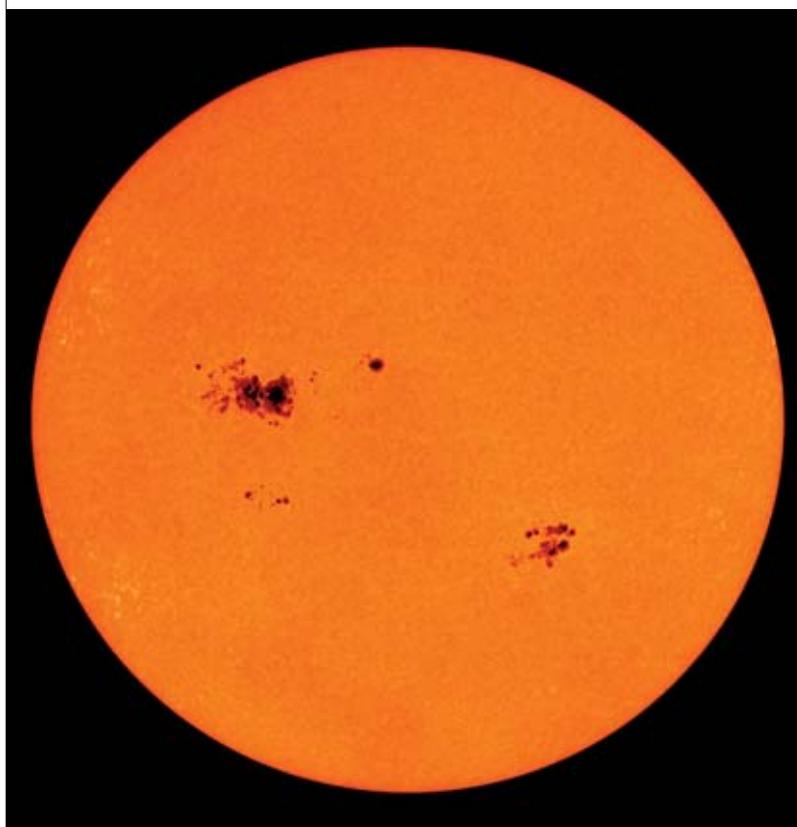
la gravitation, nous lui devons le fait que le Soleil se tient à l'intérieur de certaines limites. Chaque volume élémentaire à toutes les profondeurs est attiré vers le centre par l'attrait de la matière par la matière, et repoussé vers l'extérieur par le gradient de pression thermique. La nature réalise ainsi l'un de ses plus beaux phénomènes: l'**équilibre hydrostatique**. L'hydrogène, à l'état de proton vu la température, n'a d'autre ressource que de réagir avec ses semblables, circonvenant par la vitesse (l'énergie cinétique) la répulsion électrique qui s'exerce entre lui-même et un éventuel compagnon. Mais le fruit de leur union n'est viable que si, lors de ce court contact, un proton se transforme en neutron, avec libération d'un neutrino. Ainsi naît le **deutérium**, maillon crucial de la chaîne de réactions (encadré 1).

Apologie de la souplesse solaire

Notre étoile brille sagement d'une lumière quasi égale depuis 4,6 milliards d'années. Le Soleil est donc une centrale nucléaire durable et autocontrôlée. Pourquoi n'explose-t-il pas? Si une réaction nucléaire s'emballe au cœur du Soleil, celui-ci, gaz parfait, se dilate légèrement sous l'effet de l'accroissement de température. En se dilatant, il se refroidit et la réaction nucléaire se modère. Inversement, si une réaction nucléaire défaille, le cœur se contracte légèrement et la réaction repart de plus belle. Le Soleil doit donc en partie sa longévité à sa souplesse gazeuse. Une étoile viable, en bonne santé, est une étoile souple et gazeuse, et une étoile qui brille, chaude à l'intérieur. Mais si le Soleil brille, c'est qu'il brûle, et s'il brûle, il périra. Le Soleil est mortel, pourrait-on dire si l'on n'avait pas peur d'abuser de l'anthropocentrisme. En réalité, le Soleil ne meurt pas: il change d'état, se réorganise. Cependant, son avenir est tout tracé (encadré 2). Pour le moment, le réacteur solaire, autocontrôlé et stabilisé par la gravitation, fonctionne à merveille. L'énergie produite par les réactions nucléaires est égale à la luminosité du Soleil ($4 \cdot 10^{33}$ erg/s, soit $4 \cdot 10^{26}$ watts). Le Soleil brille parce qu'il est chaud. Toutefois, il brille longtemps car il dispose d'une source d'énergie durable: l'énergie nucléaire.

Ingénierie nucléaire du Soleil

La structure du Soleil dépend de manière sensible de l'**opacité** de la matière à différentes profondeurs, car là où elle change, l'étoile réajuste ses paramètres pour permettre la bonne migration vers la surface de l'énergie engendrée dans le cœur du réacteur pour éviter qu'elle soit bloquée en un quelconque point à l'intérieur de l'astre (figure 2). Dans la **zone radiative**, la plus proche du cœur, le gaz est hautement **ionisé**. Le transport de l'énergie y est essentiellement gouverné par la diffusion des **photons** sur les **électrons**. Dans la **zone** bouillonnante plus externe, dite **convective**, les atomes gardent une partie de leurs électrons en raison du déclin de la température. Les atomes neutres font leur apparition. De nombreux processus atomiques sont ici à l'œuvre et le niveau de l'opacité élevée rend difficile la progression des photons. De forts gradients de température s'installent, qui génèrent des courants de **convection** cyclopéens. L'enveloppe est en équilibre non pas radiatif mais convectif. C'est



Taches solaires observées le 22 septembre 2000 par l'instrument MDI du satellite SOHO.

(4) À noter que par l'intermédiaire des **positons** e^+ , le Soleil produit de l'**antimatière**.

(5) La valeur de l'opacité (coefficient qui mesure le barrage que met la matière solaire au passage des **photons**, à différentes profondeurs) est fonction de divers processus qui opèrent simultanément: diffusion des photons par les **électrons libres** et interaction avec les électrons liés.

SOHO (ESA-NASA)

Futur solaire

2



H. Bond/R. Ciardullo/Hubble Space Telescope/NASA

Le Soleil terminera inéluctablement sa vie sous la forme d'une naine blanche comme celle qui apparaît (point brillant au centre) sur cette image de la nébuleuse NGC 2440.

Pendant la plus grande partie de la vie nucléaire de l'étoile du jour, l'hydrogène est transformé en hélium dans le cœur du réacteur stellaire. Puis l'hélium fusionne pour donner du carbone et de l'oxygène. Autour du cœur, la fusion nucléaire se poursuit dans deux couches minces où l'hélium engendre du carbone et l'oxygène et l'hydrogène de l'hélium.

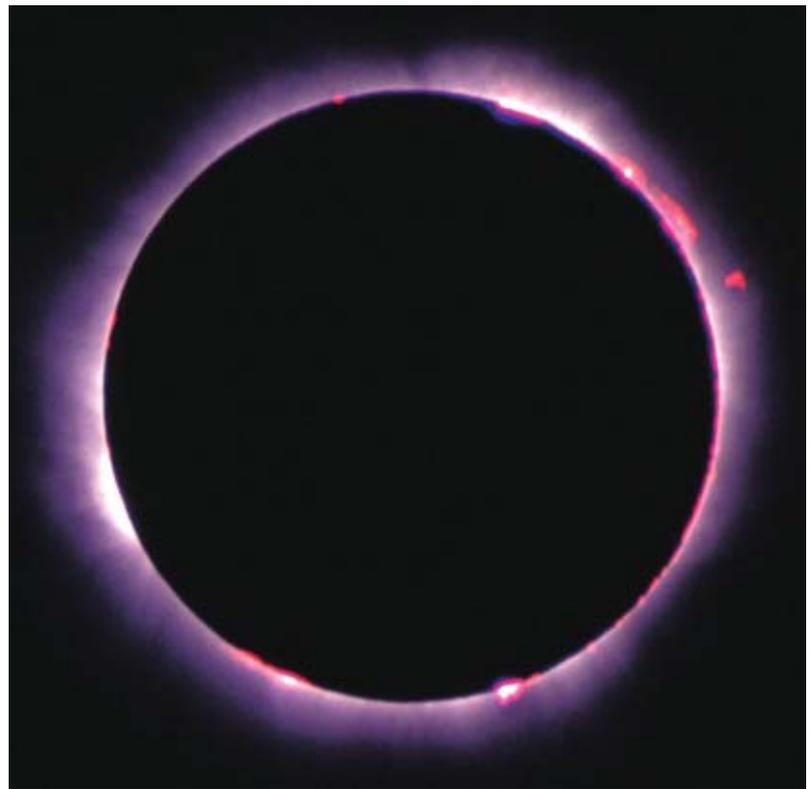
Âgé aujourd'hui d'environ 4,6 milliards d'années, le Soleil comporte suffisamment d'hydrogène dans son cœur pour qu'il prolonge sa vie lumineuse d'autant. Après avoir épuisé tout son hydrogène, il commencera à brûler l'hélium accumulé en son cœur. Il deviendra géante rouge⁽¹⁾ et demeurera 500 millions d'années dans cet état. Sa production d'énergie sera multipliée par 3000. Son diamètre, multiplié par 50, atteindra jusqu'à 3 fois la distance Terre-Soleil. Notre planète ne sera pas avalée par son étoile car celle-ci dispersera la moitié de sa masse sous forme de grand vent. Finalement, dans environ 7 milliards d'années, le Soleil éjectera ses couches externes et il ne subsistera plus qu'une petite étoile solide appelée naine blanche⁽²⁾ qui refroidira lentement pendant plusieurs milliards d'années pour se fondre dans le noir.

(1) Géante rouge : étoile brillante mais à basse température de surface (inférieure à 5 000 K), de grande dimension, parvenue à l'un des derniers stades de son évolution après transformation de son hydrogène et de son hélium en éléments lourds.

(2) Naine blanche : étoile naine de faible luminosité avec une température de surface comprise entre 2 500 et 20 000 K. Une naine blanche est une étoile froide, stable, équilibrée par la répulsion entre ses électrons, qui ayant épuisé son combustible nucléaire se condense. Un tel astre, disposant d'une masse approximativement égale à celle du Soleil pour un rayon cent fois plus petit, atteint une densité un million de fois plus grande. Dans ces conditions de densité extrême, la pression qui s'oppose à l'effondrement total est imputable uniquement aux électrons qui, en vertu du principe d'exclusion de Pauli, ne sauraient coexister à la même vitesse en un point unique. La mécanique quantique trouve ici une de ses plus belles applications astrophysiques.

l'endroit où les taches solaires et autres phénomènes électromagnétiques de surface se développent.

En fait, le Soleil ne rayonne que ce que lui permet sa médiocre transparence. Le taux de réactions nucléaires s'ajuste pour qu'à chaque seconde l'énergie perdue (rayonnée) soit remplacée par de l'énergie "fraîche". Mais brûler, au sens le plus général, c'est transformer un combustible en cendres et en lumière (énergie). Ici, le combustible est l'hydrogène et les cendres l'hélium. Lorsque le cœur du Soleil sera transformé en cendres, il connaîtra une transfiguration, un changement de structure, devenant une menace pour les planètes intérieures (encadré 2) avant de voir son enveloppe s'envoler et de n'être plus qu'une étoile naine, compacte et solide.



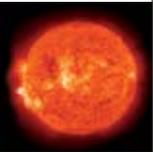
L. Duriez/Laboratoire d'astronomie de l'université de Lille 1

Éclipse totale du Soleil du 11 août 1999 photographiée dans l'Oise. Une telle éclipse est un moment privilégié d'observation de la couronne solaire.

Un vent chaud balaiera la Terre et emportera sa surface. Venus des étoiles, les atomes de la Terre et de ses morts reviendront au ciel et aux étoiles.

Un lent adoucissement du rayonnement

Mais pour le moment, nous baignons dans sa lumière tendre. Émise par les réactions nucléaires sous forme de rayons gamma, l'énergie solaire filtre du cœur solaire avec lenteur et difficulté. Les photons sont diffusés par les électrons (libres) du milieu, perdant à chaque rencontre une fraction de leur énergie. Au fil de leur traversée et de leur filtration vers la surface, les photons changent d'énergie et donc de registre, passant du rayonnement gamma au rayonnement X puis à l'ultraviolet et enfin au visible. Au bout d'une durée qui se chiffre en centaines de milliers d'années, le rayonnement originare du centre, composé de mortels rayons gamma, émerge de la photosphère sous la forme d'une lumière bénéfique et caressante à l'œil. Il ne lui faut alors que 8 minutes pour transpercer la rétine.



Structure interne : un travail d'orfèvrerie

Le Soleil est entièrement gazeux et ses atomes, depuis le centre jusqu'à la photosphère, sont effeuillés de leurs électrons. La structure interne du plasma solaire est déterminée par les conditions de conservation de la masse, du moment, de l'énergie et par le mode de transport de l'énergie, autant de conditions qui tiennent en quatre équations (encadré 3).

Mettre en œuvre un modèle solaire consiste alors à déterminer la pression, la température, la composition chimique (et bien d'autres paramètres comme le taux de génération d'énergie, le taux de production de neutrinos de diverses énergies...) à toutes les profondeurs et à chaque instant. Un modèle solaire se doit – c'est la moindre des choses – de restituer les paramètres apparents du Soleil (luminosité, rayon, température) à l'âge de 4,6 milliards d'années. Mais il doit aussi rendre compte du flux de neutrinos émis par le Soleil et de la vitesse du son là aussi à toutes les profondeurs, paramètre clé pour expliquer les oscillations physiques de notre étoile. Ce travail débouche alors sur une véritable orfèvrerie solaire (voir *Vision statique et dynamique de l'intérieur solaire*).

Le Soleil, ainsi parfaitement défini, devient un laboratoire où la physique la plus exotique et la plus raffinée peut être testée comme, par exemple, l'hypothèse de l'existence d'une matière noire constituée de particules fort fuyantes (**WIMPs**) qui, vu leur masse, se seraient accumulées au centre de l'astre.

Le modèle solaire recouvre le Soleil dans toutes les couches de son être et dans son évolution même. Ainsi est-il possible de tracer, à chaque époque, le profil radial de température, de densité et de composition. La composition chimique change au fil du temps dans la partie qui se consume (encadré 2).

Déficit de neutrinos : le Soleil disculpé

Le flux de neutrinos solaires reçu sur Terre est un des moyens de diagnostic les plus précis du bon fonctionnement nucléaire de l'astre du jour. Or les détecteurs terrestres montraient jusqu'à l'évidence que les neutrinos électroniques qui émanent du Soleil sont en nombre plus petit que prévu (voir *Les neutrinos solaires, une énigme enfin résolue*). Après un long procès, le verdict est tombé. Le coupable de ce déficit alarmant n'est pas le Soleil, mais le neutrino lui-même. Le Soleil théorique ressort lavé de tout soupçon, grâce à l'**héliosismologie**, qui a permis de contraindre sa température centrale et donc, en fin de compte, le flux de neutrinos émis (voir *Vision statique et dynamique de l'intérieur solaire*).

Ainsi se concluait un épisode ouvert en 1949 par le chimiste américain Raymond Davis, qui fut le premier à suggérer l'usage du chlore en tant que détecteur de neutrinos solaires, dispositif qu'il réalisera effectivement plus tard. Le physicien d'origine italienne Bruno Pontecorvo fit ensuite valoir que les neutrinos solaires pouvaient potentiellement intéresser les physiciens des particules et jeta les bases de la théorie moderne de l'oscillation des neutrinos entre plusieurs formes. L'astrophysicien américain John Bahcall et ses collaborateurs développèrent des



Bruno Pontecorvo qui, le premier, a émis l'hypothèse de l'oscillation des neutrinos.

■ (6) Pour une analyse historique, voir le site www.sns.ias.edu/~jnb/

Un soleil, quatre équations

3

Le Soleil est un jeu d'équations, pour l'essentiel au nombre de quatre. Ces équations décrivent l'équilibre de l'**étoile**, la répartition de la masse, la production d'énergie ainsi que son transfert, depuis le **cœur** jusqu'à la surface. Ces équations différentielles couplées sont résolues au moyen de puissants ordinateurs. Les paramètres physiques (essentiellement la composition initiale, les taux de réactions nucléaires et les **opacités**) sont déterminés par des communautés entières d'experts, astronomes et géophysiciens, physiciens nucléaires et physiciens du cortège électronique. La composition chimique, pour sa part, n'est altérée que dans les zones de brûlage : la surface est intacte, au **lithium** près.

modèles solaires toujours plus détaillés. Un modèle élaboré au centre CEA de Saclay parvint néanmoins à s'imposer.

La saga des neutrinos a mobilisé toute une communauté de chimistes, d'astronomes, d'ingénieurs et d'informaticiens, notamment au CEA, qui ont contribué de manière critique à raffiner la physique nucléaire, l'astrophysique et les détecteurs. Si bien que les neutrinos solaires ont été un banc de test de précision non seulement de l'évolution stellaire, mais aussi de la théorie de l'interaction faible⁽⁶⁾.

Le modèle solaire a tenu bon

Au cours des dernières années, notre connaissance de l'intérieur du Soleil a progressé de manière spectaculaire. Par le truchement des tremblements de Soleil (car le Soleil tremble et sa lumière aussi), il a été possible de déduire la vitesse du son à diverses profondeurs avec une précision de une partie pour mille. Cette même méthode a permis d'accéder à des propriétés importantes de l'enveloppe convective (profondeur, rotation, teneur d'hélium à sa base). La mesure de flux de neutrinos induits par la désintégration du bore, obtenue en combinant les données de SNO (*Sudbury Neutrino Observatory*) au Canada et de Super-Kamiokande au Japon, a fourni une estimation de la température centrale du Soleil dont la précision avoisine le pour-cent. L'héliosismologie a montré clairement que le problème des neutrinos solaires ne pouvait pas être imputé à une erreur sur le profil de température de l'astre du jour. Il est satisfaisant de constater que finalement aucune des hypothèses de base formulées dans les modèles solaires de l'époque n'a été mise en défaut, ce qui rassure les chercheurs qui ont pris le relais des pionniers (au nombre desquels il faut ajouter William Fowler) sur leurs possibilités de comprendre de manière toujours plus approfondie le Soleil et les étoiles.

«*Soleil lève-toi, les atomes dansent.*» (Rumi)

➤ Michel Cassé

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 avoi-

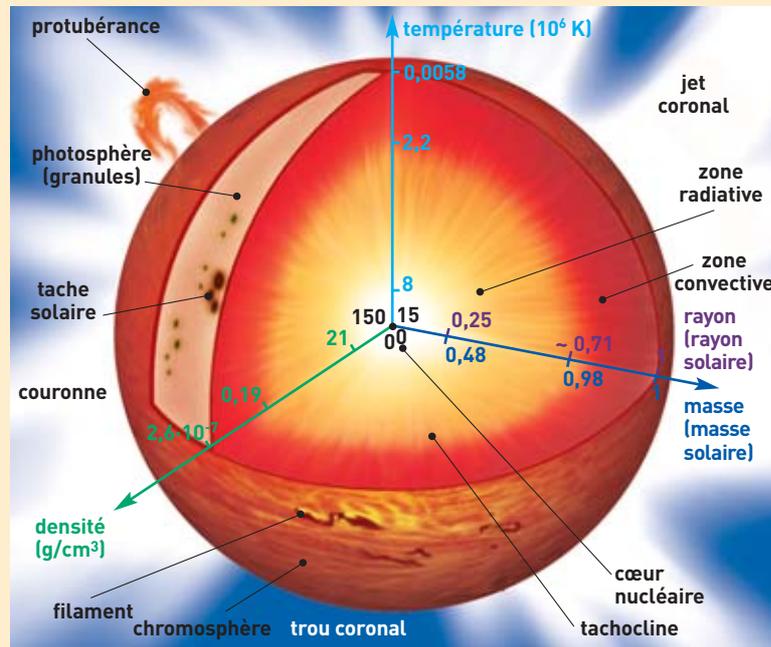


Figure.

sinantes. 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. 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 millièème de milliardième de sa masse par an.

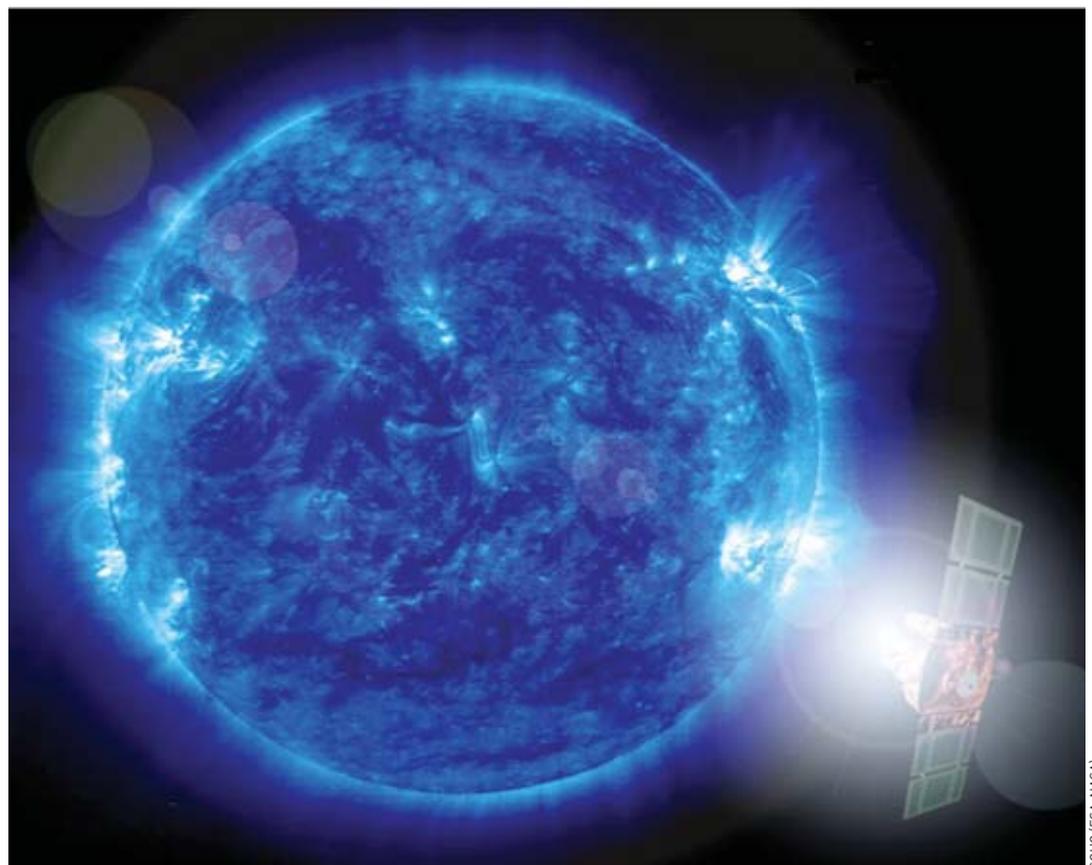


Grâce aux nouvelles techniques d'observations astronomiques, notre vision de l'intérieur du Soleil est en pleine évolution. D'un statut d'astre chaud, stable et fidèle, le Soleil est devenu un véritable laboratoire de physique présentant des conditions de température et de densité inaccessibles sur Terre. Ceci a permis de repousser les frontières des connaissances de la matière dans le domaine des plasmas et de la physique des particules. La compréhension des étoiles amène le développement de nouveaux champs d'investigation auprès des réacteurs nucléaires et des lasers de puissance. Sont aujourd'hui en discussion la connexion entre les différentes échelles temporelles et de nouveaux questionnements sur le rôle de la rotation et du champ magnétique ainsi que leurs implications dans l'interaction du Soleil avec la Terre.

Vision statique et dynamique de l'intérieur solaire

L'apport décisif de l'héliosismologie à la connaissance de l'astre

Plusieurs disciplines ont fait progresser de façon décisive, ces dernières années, la compréhension de notre étoile. Parmi elles, l'étude des "tremblements de Soleil" a joué un rôle majeur en donnant une nouvelle consistance aux modèles de l'astre du jour.



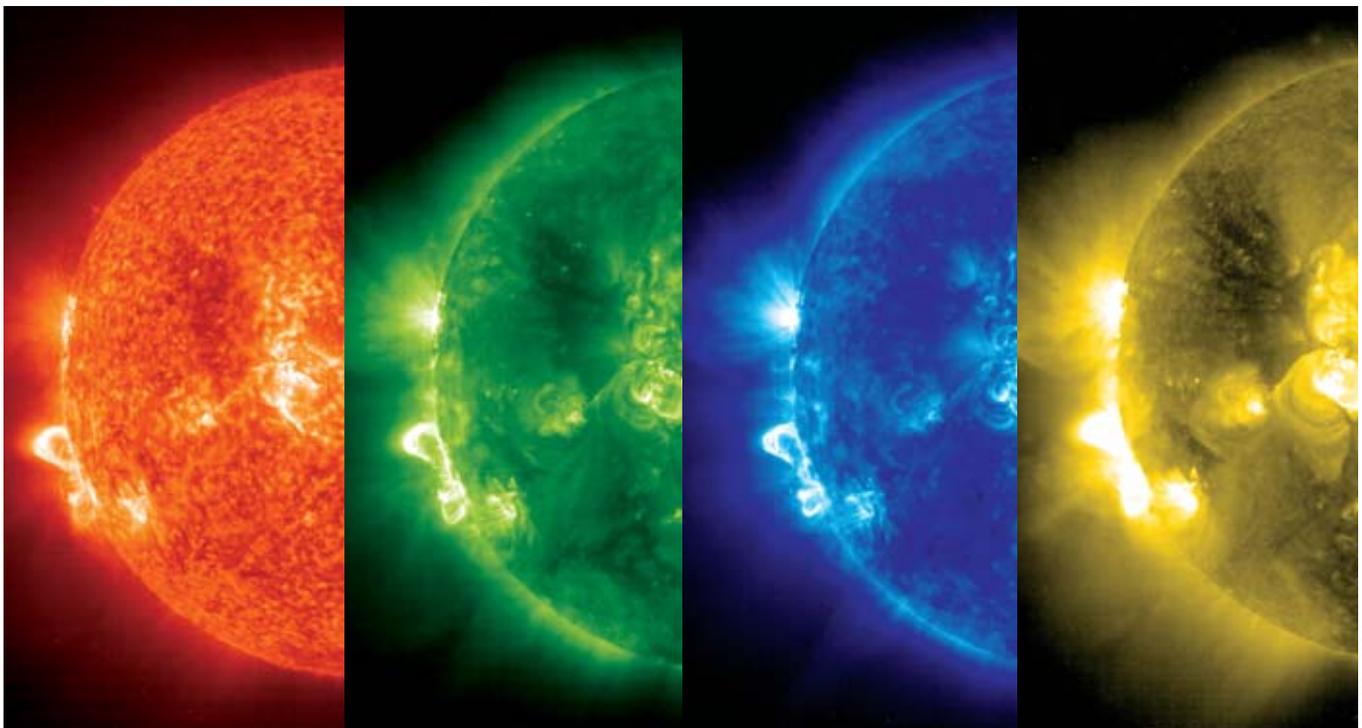
Le satellite SOHO, avec ses douze instruments embarqués, scrute sans relâche le Soleil.

Il y a souvent un grand pas entre comprendre comment fonctionne un objet céleste et pouvoir le décrire avec suffisamment de précision pour que lui-même devienne un laboratoire pour étendre notre connaissance en physique fondamentale.

Le Soleil, une référence en astrophysique

Ce pas a été franchi en ce qui concerne le Soleil. L'astrophysicien complète l'astronome qui observe, en interprétant ses observations. Son rôle, dans un premier temps, est de chercher les processus dominants puis d'en ajouter d'autres, secondaires, jusqu'à reproduire les observations. Pendant longtemps, compte tenu de la limitation des observations au **spectre visible**, l'astrophysique est apparue aux autres

entièrement dédié à l'observation du Soleil. Sa supériorité est de réunir à son bord douze instruments qui regardent le Soleil à des **longueurs d'onde** différentes. Cinq instruments sont consacrés à l'étude de l'**atmosphère solaire**, testant ainsi la **couronne**, la **chromosphère** et la **photosphère** situées à des températures différentes et présentant donc des aspects de **plasmas** différents (encadré A, *Toute la lumière sur le Soleil*, p. 13). Quatre autres sont destinés à l'étude du **vent solaire**. Trois instruments de sismologie solaire permettent de sonder l'intérieur de l'**étoile**, occasion unique d'en bâtir enfin une vision complète. Les équipes du CEA ont participé activement à la conception, à la réalisation de l'instrument de sismologie solaire **GOLF** (*Global Oscillations at Low Frequencies*; voir *Les mesures sismiques solaires*,



Le Soleil vu sous différentes longueurs d'onde par l'instrument EIT (*Extreme ultraviolet Imaging Telescope*) embarqué à bord de SOHO. L'observation de plusieurs raies d'absorption permet de sonder les températures de la granuleuse photosphère (5800 K) à gauche jusqu'à la couronne où le plasma est de nouveau chauffé à des millions de degrés (à droite), en passant par la chromosphère située près du minimum de température. Il est ainsi possible de suivre les manifestations d'activité du Soleil, dont l'origine se trouve sous la photosphère.

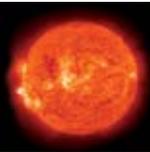
domaines de la physique comme une science approximative ou d'ordre de grandeur. Ce fut pourtant une étape clé et décisive dans la compréhension de l'Univers, car le nombre de processus mis en jeu est très important et la cohérence d'ensemble redoutable, ce qui signifie que la palette de l'astrophysicien doit être très riche. Il doit être capable de ne pas s'égarer à travers tous les possibles.

Aujourd'hui, l'ensemble du **spectre électromagnétique** est accessible grâce à la mise sur orbite d'instruments spatiaux et au développement de détecteurs spécifiques. Dans le cas du Soleil, cela permet de mettre en évidence les éjections de particules, les vents, les **rayons X** et **ultraviolets**... Lancé en 1995, le satellite SOHO (*Solar and Heliospheric Observatory*), collaboration internationale entre l'Agence spatiale européenne (ESA) et la *National Aeronautics and Space Administration* (NASA),

encadré), ainsi qu'à son interprétation. Ceci donne du Soleil des images bien étonnantes et révèle la richesse de nos visions solaires (encadré B, *Des spectres qui en disent long*, p. 17).

Une étoile passée au crible de la sismologie

La résolution des équations de structure (voir *Soleil nucléaire*, encadré 3) nécessite d'introduire une physique riche et complexe qui décrit les conditions thermodynamiques de l'étoile que l'on souhaite modéliser. Entre 1960 et 1985, une rapide revue de l'ensemble des conditions stellaires a été faite, et les étoiles ont pris vie avec des chemins évolutifs fort différents (voir *Soleil nucléaire*, figure 1). Un pas a été de nouveau franchi, ces vingt dernières années, grâce au développement de



l'**héliosismologie** qui a vraiment fait passer cette science du qualitatif au quantitatif.

Cette technique, empruntée aux géophysiciens, est caractérisée par la richesse de son information. En effet, l'astrophysicien est doublement chanceux. D'une part, le Soleil est un gaz, assimilable à une sphère, et la propagation des ondes est ainsi relativement facile à décrire. D'autre part, le phénomène d'excitation des modes est permanent et produit par le Soleil lui-même (voir *Les mesures sismiques solaires*). Il n'y a par conséquent aucune source supplémentaire à décrire, pas d'interaction perturbatrice et un signal continu. Toute l'information portée par ces ondes concerne donc directement le plasma solaire.

Deux types d'ondes se propagent dans le Soleil. Les *ondes acoustiques* sont engendrées par les fluctuations de pression induites par la **granulation** de surface. Les *ondes de gravité* proviennent principalement de l'interface entre la **convection** et la **radiation** et sont régies par la **gravité** (figure 1). Seuls les modes acoustiques ont fourni une information exploitable actuellement. Leur richesse vient de la possibilité unique de **résoudre** le Soleil en un grand nombre de pixels, 1024×1024 pour l'instrument MDI (*Michelson Doppler Imager*)

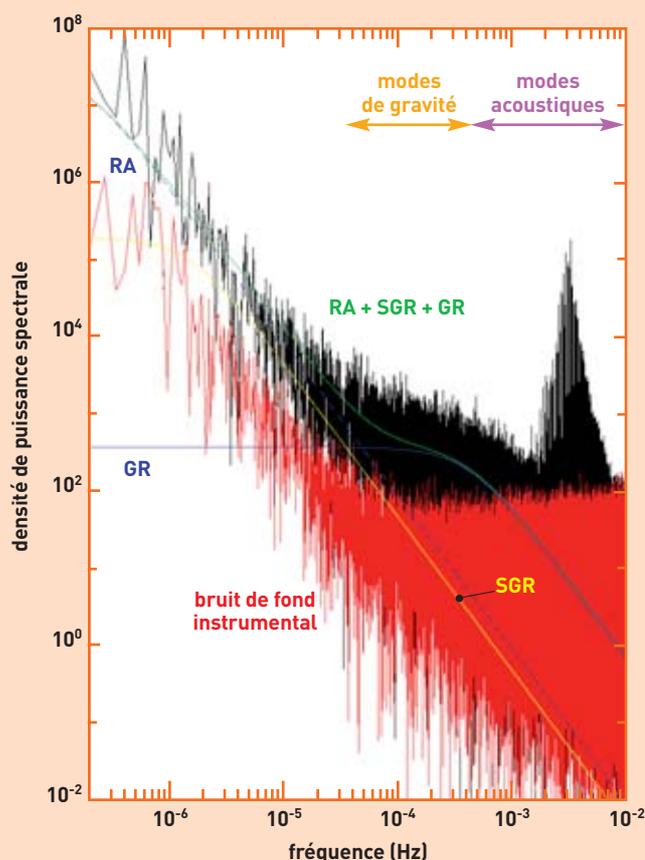
embarqué à bord de SOHO, qui mesure les ondes les plus superficielles, ou de le regarder globalement comme le fait GOLF, qui détecte les modes pénétrant jusqu'au **cœur**. L'ensemble des modes acoustiques existants, en fait des millions, est accessible à l'observation. Ceci permet de reconstruire les propriétés du plasma solaire de la surface jusqu'à une fraction du cœur nucléaire, en s'appuyant sur deux quantités : la vitesse du son et la décomposition des modes en composantes liées à la rotation et au champ magnétique des couches traversées.

Armés de tels outils de confrontation, il devient possible de résoudre les équations de structure et passer ainsi d'une vision purement théorique à une vision numérique, quantitative et vérifiable. Cette stimulation intellectuelle entre théoriciens, numériques et observateurs a permis de répondre à des questions concrètes comme : quels sont les véritables flux de **neutrinos** émis par le Soleil ? Quelle est la température centrale ? Quel est l'âge des étoiles les plus anciennes ?...

Un laboratoire riche de physique complexe : l'état de la matière

La composition du Soleil provient du nuage dans lequel il est né. Celui-ci a fixé la quantité d'**hydrogène** disponible dans le cœur nucléaire. Le profil radial de la vitesse du son reflète l'état thermodynamique de la matière et ses brusques changements. Il est possible d'identifier des régions où les **éléments** importants changent d'état (encadré 1) : position où l'**hélium** devient partiellement **ionisé**, position où le transport ne se fait plus par radiation mais par convection grâce en particulier au changement d'état d'ionisation de l'oxygène (encadré 2). Dans la partie centrale, le profil de la vitesse du son est aussi très sensible à la réaction principale pp (**proton + proton**) et donc à sa **section efficace** d'interaction, ainsi qu'aux autres réactions importantes de **fusion**.

L'extraction précise de la vitesse du son, aujourd'hui obtenue à quelques 10^{-4} , offre la possibilité d'observer le plasma solaire *in situ*. Ainsi, l'héliosismologie a permis d'évaluer la quantité d'hélium photosphérique, inaccessible à la mesure directe, et donc indirectement celle de l'hydrogène. Le fait que l'hélium représente le quart de la masse à la photosphère a beaucoup surpris. C'est une valeur quasiment **primordiale** alors que le Soleil est né environ 8 milliards d'années après la formation de notre **galaxie**. Ce résultat met en évidence la nécessité d'introduire la lente migration **gravitationnelle** relative à l'hydrogène de l'ensemble des éléments et d'en quantifier l'effet : en 4,6 milliards d'années, la composition relative d'hélium par rapport à l'hydrogène est réduite de 8 à 9 % en **fraction de masse** par rapport à la valeur initiale, celle des éléments plus lourds comme le carbone, l'azote et l'oxygène d'environ 10 %. Un détail, en apparence, mais avec un fort impact sur l'âge des plus vieilles étoiles, qui s'en sont trouvées rajeunies de plusieurs milliards d'années. Puis le profil de la vitesse du son a mis en évidence ce brutal mais tenu changement de pente qui est le signe d'une modification de transport d'énergie entre la convection et la radiation, avec un comportement très particulier sur une extension de quelques pour-cent en rayon (voir la figure 3).



R. Garcia / CEA

Figure 1.

Domaine fréquentiel des deux types de modes. Les modes acoustiques apparaissent au-dessus de 0,5 mHz, le domaine des modes de gravité est situé entre 50 μ Hz et 0,5 mHz. Sont surimposés sur les observations de GOLF, le bruit instrumental et les bruits solaires associés à la granulation (GR), aux régions actives (RA) et à la supergranulation (SGR). La vitesse du son dans le milieu se déduit de la mesure du temps acoustique de propagation d'un mode, à condition de disposer d'un modèle proche pour définir la taille de la cavité traversée. Elle est directement reliée aux quantités thermodynamiques par la relation $c^2 = \gamma P / \rho$, où γ , P et ρ désignent respectivement l'indice **adiabatique** du gaz, la pression et la densité. Par l'étude de ces modes, il est aussi possible d'accéder à la rotation interne et à des effets de champ magnétique.

B Des spectres qui en disent long

Les différents rayonnements se distribuent le long du **spectre électromagnétique** en fonction de leurs longueurs d'onde, des plus courtes et des plus énergétiques (**rayonnement gamma**) aux plus longues (les ondes radio), en passant par la lumière visible. Le spectre de ce dernier domaine, par exemple, est obtenu en faisant passer la lumière par un prisme qui la décompose en ses différentes composantes, du rouge au violet (figure a). Un arc-en-ciel donne aussi un spectre de la lumière visible émanant du Soleil, par réfraction et réflexion dans et sur des gouttes d'eau.

Ce même principe s'applique à l'ensemble des **rayonnements électromagnétiques** en utilisant des **spectrographes**, qui analysent la répartition spectrale de l'énergie de ces rayonnements et des **spectromètres** qui enregistrent les spectres élément par élément à l'aide de détecteurs photo-électriques et mesurent l'intensité des rayonnements en fonction de leur **longueur d'onde**.

En astrophysique, la **spectroscopie** consiste à étudier les corps à distance à partir des rayonnements qu'ils émettent ou des transformations que font subir à ces derniers d'autres corps situés sur leur trajet. Les spectres font apparaître, entre de larges bandes continues (dont chacune porte le nom de continuum spectral), des raies correspondant chacune à une longueur d'onde particulière et, finalement, à l'énergie d'un atome ou d'une molécule du corps observé. Ces **raies spec-**

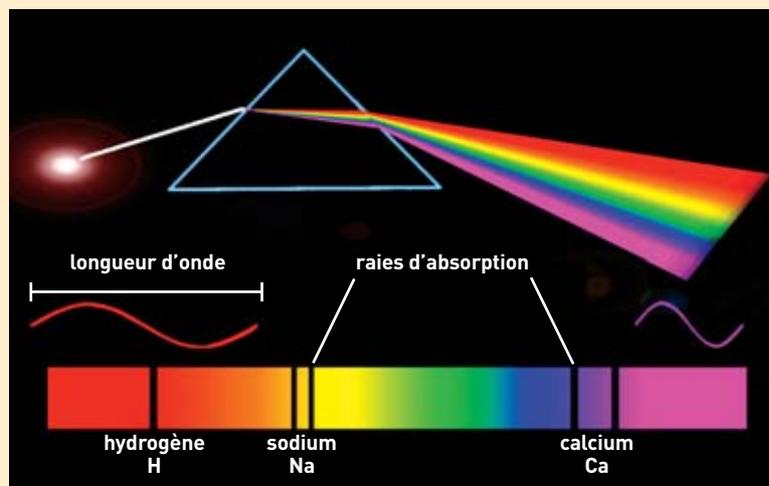


Figure a.

trales sont de deux types, les raies d'émission et les raies d'absorption.

Les **raies d'émission**, claires, correspondent à des rayonnements émis directement par un corps porté à très haute température. Le **spectre d'émission** permet donc de détecter la présence d'atomes ou de molécules dans l'objet émetteur.

Les **raies d'absorption**, sombres, correspondent également à une longueur d'onde précise, mais en vertu du processus par lequel l'intensité d'un rayonnement décroît quand il traverse un milieu matériel auquel il transfère tout ou partie de son énergie. C'est ainsi que l'on peut analyser la composition d'une source chaude radiative comme le Soleil à partir de l'absorption par son atmosphère d'une partie des rayonne-

ments électromagnétiques qu'il émet (**spectre d'absorption**).

Ce n'est pas tout : l'analyse du décalage spectral permet d'évaluer le mouvement relatif du corps émetteur, grâce à l'**effet Doppler-Fizeau**⁽¹⁾, selon le même principe qui rend de plus en plus aigu le bruit d'un véhicule qui s'approche d'un observateur et de plus en plus grave celui de l'engin qui s'en éloigne. La variation apparente de **fréquence** (d'autant plus élevée que la longueur d'onde est plus courte) est ainsi proportionnelle à la vitesse relative entre l'observateur et la source.

Pour une source lumineuse, cet effet indique que les raies du spectre de cette source sont décalées vers le bleu (**blueshift**), autrement dit des longueurs d'onde plus courtes, quand elle s'approche ou vers le rouge (**redshift**) pour des longueurs d'onde plus longues quand elle s'éloigne (figure b).

L'effet Doppler est notamment utilisé en astrophysique pour connaître la vitesse radiale des étoiles ou des galaxies car leur mouvement, selon la perspective, provoque un déplacement des raies émises par rapport à leur valeur nominale ou aux mêmes raies émises par une source terrestre.

Enfin, la division de raies spectrales en réponse à un champ magnétique (**effet Zeeman**) est utilisée pour mesurer la puissance des champs magnétiques d'objets astronomiques, en particulier du Soleil.

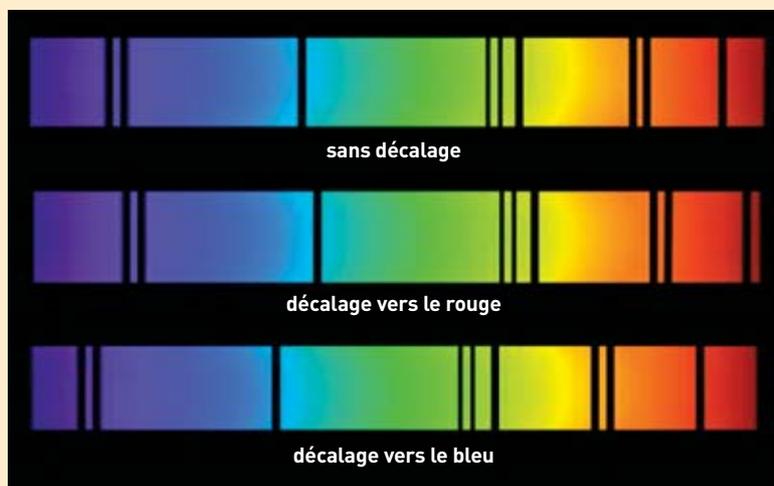
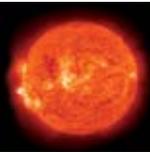


Figure b.

(1) Découvert par le physicien autrichien Christian Doppler pour les ondes sonores, cet effet a été étendu à l'optique par le Français Hippolyte Fizeau.



Les caractéristiques du plasma solaire

1

Le gaz est sous forme d'un **plasma** dans tout l'intérieur solaire. Est appelé plasma l'état d'un gaz où les **électrons** se trouvent dissociés des **protons**. Ainsi, alors qu'un **atome** est neutre (autant de protons de charge positive que d'électrons de charge négative), un plasma est une assemblée de constituants chargés. Un **élément** peut être totalement ou partiellement **ionisé**, cet état dépend de la température et de la densité. Plus elles sont élevées, plus le plasma est ionisé.

Prenons l'exemple de l'oxygène. À l'état d'atome, il est constitué d'un **noyau**, comportant 8 protons et 8 **neutrons**, et d'électrons périphériques qui restent liés au noyau. Au centre du Soleil, où la température et la densité atteignent respectivement $15 \cdot 10^6$ K et 150 g/cm^3 , l'oxygène est complètement ionisé, se présentant sous la forme d'un noyau 8 fois chargé positivement et de 8 **électrons libres** qui se promènent au rythme de l'agitation thermique. L'oxygène est dans cet état de plasma dans toute la **région radiative**, mais plus la température et la densité vont décroître, moins les électrons vont se détacher de l'influence du noyau. Vers quelques millions de degrés, un électron restera lié au noyau oxygène, puis deux, puis trois jusqu'à ce que l'oxygène apparaisse sous l'aspect atomique à la surface du Soleil.

Dans un plasma, les mouvements des différents constituants sont liés à l'agitation thermique, mais aussi aux mouvements d'ensemble imposés par la rotation du gaz. La présence de particules chargées positivement et d'autres négativement va créer des courants et éventuellement des **champs magnétiques**.

Dans la région radiative, la prise en compte de la composition détaillée et des sections efficaces d'interaction des **photons** a permis de mieux évaluer la température centrale et donc les taux de réactions thermonucléaires. Il a fallu plus de dix ans aux différentes équipes travaillant aux États-Unis et en France sur l'interaction photon-matière pour introduire tous les processus et tous les éléments qui contribuent à définir le cheminement des photons du centre du Soleil à la surface (encadré 2). Il n'est possible de sonder le cœur nucléaire que si les scientifiques maîtrisent correctement les régions plus externes. Ceci nécessite

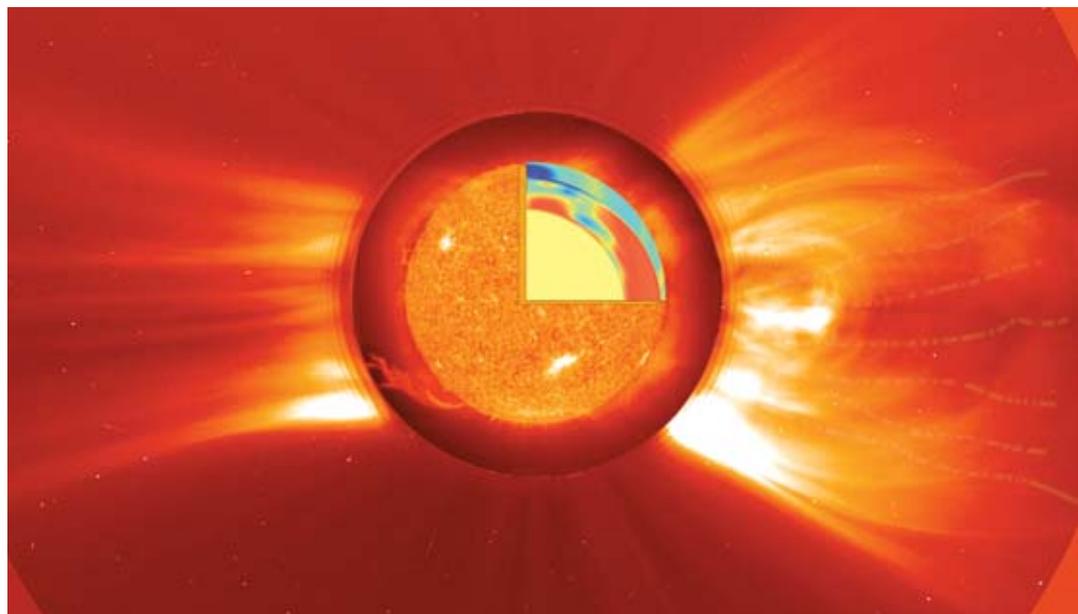
un effort dans la qualité d'extraction des fréquences des modes et aussi dans la modélisation théorique, car la compréhension du Soleil repose sur l'adéquation entre les représentations théorique et sismique.

Un cœur nucléaire en partie maîtrisé

Il ne suffit pas de connaître les réactions nucléaires impliquées dans l'évolution des étoiles pour décrire correctement le cœur nucléaire à cause de la très forte dépendance en température de la plupart d'entre elles. Le Soleil est l'unique plasma disponible à ce jour pour tester l'**interaction faible**, la production de neutrinos (encadré 3) et les spécificités du plasma. Beaucoup de physique est nécessaire pour décrire les 25% les plus internes en rayon, qui renferment plus de la moitié de la masse du Soleil. Celui-ci doit sa longévité au fait que l'interaction entre deux protons, qui est la réaction de départ du processus de fusion, est une interaction faible, laquelle n'est pas accessible au laboratoire. Cette interaction est directement liée au temps de vie du **neutron**, estimé en l'occurrence à 8 minutes, un proton s'étant transformé en neutron : elle a donc un caractère fondamental. Par ailleurs, la réaction pp, régie par l'interaction faible, est la principale source de neutrinos émis par le Soleil. Bien comprendre le plasma solaire est aussi crucial pour caractériser les plasmas que les physiciens cherchent à fabriquer dans le futur pour l'énergie de fusion, car les conditions thermodynamiques du plasma sont similaires même si les réactants sont différents (voir le chapitre II).

Des mesures en laboratoire complexes

Pour définir à quel rythme les protons se transforment en hélium à travers les réactions définies dans l'encadré 1 de l'article *Soleil nucléaire*, les sections efficaces des différentes chaînes ppI, ppII, ppIII et du **cycle CNO** doivent être connues. Seules celles gouvernées par l'**interaction forte** sont accessibles à l'expérimentation et de nombreux laboratoires de physique nucléaire ont entrepris ces mesures. L'astrophysicien américain



Le satellite SOHO teste le Soleil de sa partie intime jusqu'à la couronne où les éruptions peuvent être violentes emportant des centaines de tonnes du plasma solaire. L'asymétrie de ces éjections est clairement visible et importante pour comprendre la vie magnétique d'une étoile comme le Soleil.

SOHO (ESA-NASA)

William Alfred Fowler a compilé l'ensemble des résultats obtenus et a reçu le prix Nobel de physique en 1983 pour cet effort considérable. Toutefois, les conditions de laboratoire ne sont pas celles des étoiles. Les expériences sont en général effectuées à énergie plus haute que celle rencontrée dans le plasma solaire, car la **barrière coulombienne** exclut souvent ce domaine, qui varie de 1,5 keV pour l'interaction pp à quelques dizaines de keV pour les réactions du cycle CNO (variation en $Z_1 Z_2$ où Z est le nombre de protons des réactants). De plus, la plupart des mesures en laboratoire se font entre **atomes** et non entre ions. Il faut donc extrapoler les mesures en laboratoire aux basses énergies correspondant aux conditions solaires, corriger les expériences en laboratoire des effets coulombiens rencontrés et réintroduire les effets coulombiens des ions considérés du plasma solaire. Enfin,

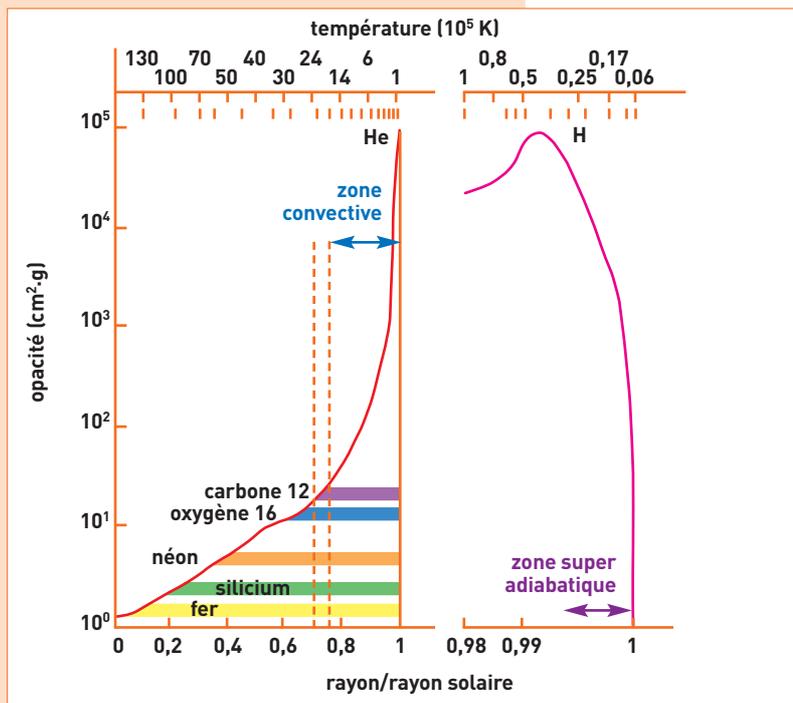
il est nécessaire d'introduire théoriquement l'effet d'accélération des interactions nucléaires dû aux **électrons libres** et aux ions spectateurs. C'est à cause de cette complexité que les mesures en laboratoire se sont étalées sur une trentaine d'années, avec encore récemment de très jolis résultats destinés à relever certains des challenges précités. Ainsi, la mesure ${}^3\text{He}-{}^3\text{He}$ a fait intervenir des ions et représente le cas unique réalisé aux conditions d'énergie stellaire. D'autre part, la section efficace de la réaction ${}^7\text{Be} + p \rightarrow {}^8\text{B} + \gamma$, très difficile à mesurer et qui est déterminante pour prédire les neutrinos détectés par les expériences Super-Kamiokande et SNO, a été contrôlée par différentes méthodes et en particulier par l'équipe française du CSNSM⁽¹⁾ d'Orsay.

(1) Centre de spectrométrie nucléaire et de spectrométrie de masse (CNRS - IN2P3 - Université Paris-sud).

Le transport de l'énergie : l'interaction photon-matière

2

À chaque réaction nucléaire, de l'énergie est évacuée sous forme de **photons**. Typiquement, la transformation de 4 protons en **hélium** libère 27 MeV. L'énergie produite va équilibrer l'**étoile**, en compensant celle émise à la surface. De l'émission dans le **cœur nucléaire** jusqu'à 0,71 rayon solaire, cette énergie est transmise par les photons : c'est ce qui est appelé le rayonnement radiatif. Les photons sont des messagers, dont le cheminement est erratique et complexe, allant de la simple diffusion, dite *diffusion Thomson*⁽¹⁾, sur les **électrons libres** à des interactions avec les **électrons liés**, soit en les faisant changer de niveau électronique, soit en libérant l'électron. Au cours de ces interactions, les photons perdent de l'énergie et se séparent en photons de plus en plus basse énergie. Ces multiples interactions sont définies par des **sections efficaces** d'interaction et dépendent de l'état du **plasma** pour chaque espèce présente. Les sections efficaces diffèrent fortement selon les processus considérés. Certaines sont proportionnelles à Z (nombre de protons du **noyau**), d'autres à Z^2 , d'autres enfin à Z^4 . Cela conduit à donner un rôle à chaque espèce. En effet, comparer un **ion hydrogène** et un ion fer revient, quand l'interaction est du type électron lié-électron lié, à comparer $Z^4 = 1$ à $Z^4 = 457\,000$. Ceci montre immédiatement que pour faire un calcul correct du transfert d'énergie, il faudra connaître la composition détaillée du Soleil. Même si l'hydrogène et l'hélium à eux seuls représentent plus de 99 % des ions présents initialement dans le Soleil, les quelques pour mille restants vont jouer un rôle considérable dans ce transfert, limitant ainsi la montée rapide en température du cœur et donc jouant directement sur la longévité du Soleil. Aujourd'hui, seul le fer est partiellement **ionisé**, c'est-à-dire qu'il possède encore plusieurs électrons périphériques, dans le plasma solaire central (figure). En se déplaçant du centre vers l'extérieur, de plus en plus d'espèces telles que le nickel, le sodium, l'oxygène... se retrouvent partiellement ionisées et en interaction avec les photons qui voyagent. Vers 0,71 rayon solaire, l'oxygène, **élément** le plus abondant après



S. Turck-Chièze / CEA

l'hydrogène et l'hélium, devient partiellement ionisé. Les photons se retrouvent pratiquement bloqués par leurs interactions multiples et l'énergie n'arrive presque plus à être transportée. La température continue de décroître, le carbone et l'azote deviennent à leur tour partiellement ionisés. La **convection** prend alors le relais, évacuant plus facilement l'énergie vers la surface, tout en homogénéisant la composition de l'étoile. Les photons continueront bien sûr à évacuer de l'énergie mais avec une efficacité très faible. Ensuite c'est le tour de l'hélium puis de l'hydrogène de récupérer leurs électrons, augmentant encore l'**opacité**. Les photons, en approchant de la surface, rencontrent enfin des espèces neutres, voire moléculaires. La section efficace d'interaction photon-matière redevient de nouveau faible et finalement les photons d'énergie correspondant au **spectre visible** s'échappent de la **photosphère**.

Section efficace d'interaction des photons avec le plasma stellaire en fonction du rayon solaire.

(1) Diffusion Thomson : diffusion élastique à haute énergie sans modification de la **longueur d'onde**.



température centrale	$T_c = 15,71 \cdot 10^6$ K
densité centrale	$\rho_c = 153,13$ g/cm ³
composition en hydrogène au centre	$X_c = 0,3385$ en fraction de masse
température de surface	$T_{\text{eff}} = 5800$ K
abondance d'hélium en surface	0,251 en fraction de masse
abondance d'hélium initial	0,272 en fraction de masse

Tableau 1.
Les caractéristiques du modèle sismique.

Le rôle déterminant de l'héliosismologie

Dans cette problématique complexe, certains éléments du calcul nucléaire pouvaient échapper à la sagacité du physicien. Aussi, l'approche théorique couplée à l'héliosismologie a été précieuse. En extrayant très précisément le profil de la vitesse du son avec GOLF et MDI, jusqu'à 6 % en rayon du centre du Soleil, les astrophysiciens du CEA ont pu caractériser le plasma solaire. En particulier, la section efficace $p + p$, qui n'était connue que théoriquement, est maintenant déterminée à 1 % près.

Mais quelles sont ces propriétés mystérieuses du plasma stellaire ? Comment vaincre la barrière coulombienne entre deux protons chargés positivement ? Les particules le font naturellement grâce à leur vitesse initiale et à l'**effet tunnel**. L'énergie de l'interaction n'est pas l'énergie thermique, mais une énergie nettement plus élevée. Cet effet, qui a été compris par l'astrophysicien américain d'origine russe George Anthony Gamow, réduit le nombre de protons concernés par ces réactions nucléaires. Si tel n'était pas le cas, le Soleil brûlerait son combustible en quelques millions d'années ! En effet, tous les protons ne se déplacent pas à la vitesse thermique du gaz. Ils se répartissent selon une distribution maxwellienne⁽²⁾ de la vitesse. Cette propriété est déterminante pour compter le nombre d'interactions et définir l'énergie de l'interaction,

(2) Distribution maxwellienne : dans le gaz, les protons n'ont pas tous la même vitesse mais des vitesses réparties aléatoirement autour d'une moyenne. La vitesse moyenne est égale à $(8/\pi k_B T/m)^{1/2}$ où m représente la masse du proton, T la température du gaz et k_B la constante de Boltzmann qui vaut $1,38 \cdot 10^{-23}$ joules/degré K.

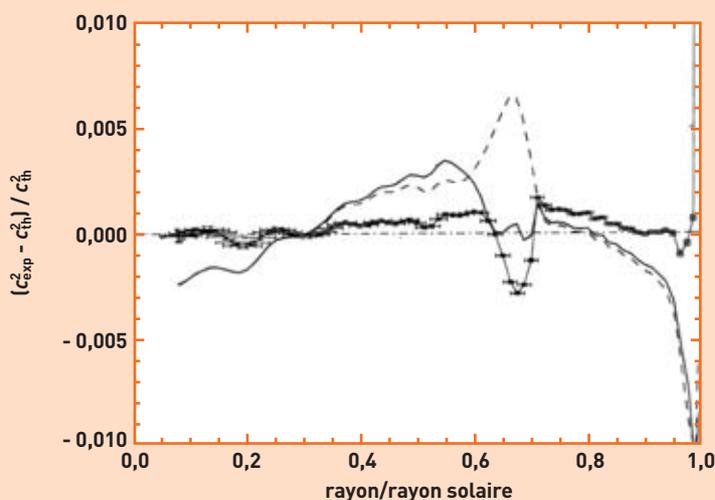
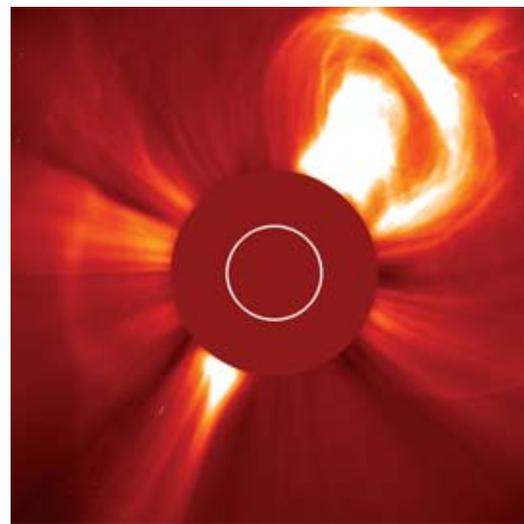


Figure 2.
Différence entre le carré de la vitesse du son extraite des ondes acoustiques observées par GOLF et MDI et le carré de celle de modèles solaires, pour un modèle purement théorique sans effets macroscopiques (pointillés), pour un modèle incluant le mélange lié au traitement de la région de transition radiation-convection (trait plein) et pour un modèle sismique ajustant certaines quantités physiques, dans la limite des incertitudes, pour reproduire au mieux l'observation dans la région radiative.



Éjection de masse coronale observée par l'instrument LASCO (Large Angle and Spectrometric Coronagraph), embarqué à bord de SOHO. Des particules de haute énergie sont brusquement libérées à des vitesses de 300 km/s en moyenne dans le milieu interplanétaire et peuvent interagir avec l'atmosphère terrestre.

surtout pour l'interaction forte, qui est si dépendante de cette énergie (ou température). De plus, les électrons libres jouent le rôle d'accélérateurs de l'interaction. Pendant de nombreuses années, des doutes ont plané sur la justesse de la distribution en vitesse et sur les phénomènes dits "d'écrantage". Pouvait-elle être perturbée par le plasma lui-même ou par la présence d'autres espèces ? Là encore, l'héliosismologie a apporté des réponses déterminantes. Si la distribution de vitesse n'est pas totalement maxwellienne, cela a un impact important sur les interactions mises en jeu pour des éléments dont le nombre de protons est supérieur à 3 et la vitesse du son en est directement affectée dans sa partie centrale. Aucune signature de tels phénomènes n'a été identifiée par les mesures sismiques.

Des modèles qui convergent

Au fur et à mesure des améliorations théoriques et des progrès de la sismique, la qualité des modèles solaires s'est imposée et la physique introduite aujourd'hui est d'une grande richesse. Au cours des années, les différences entre vitesse du son extraite des modes acoustiques et vitesse du son des modèles solaires se sont réduites (figure 2). Après vingt ans de travail, le modèle sismique est devenu un modèle représentatif du Soleil dans la partie radiative. Ses caractéristiques sont présentées dans le tableau 1 et les informations obtenues pour les 2 000 couches peuvent être consultées sur les pages web du Service d'Astrophysique du CEA⁽³⁾.

(3) Voir le site www.dapnia.cea.fr/Phys/Sap/Documents/soleil/solarmodel.html

La production d'énergie par **interaction faible** entre deux **protons** s'accompagne de la transformation d'un proton en **neutron** avec émission de **neutrino**. Réaction fondamentale dans le processus de **fusion**, le nombre de neutrinos ainsi engendrés se déduit directement de la luminosité totale et de l'énergie libérée lors de la transformation de 4 protons en **hélium**. 65 milliards/cm²/s de neutrinos arrivent sur Terre en permanence. Dès les années soixante, le physicien d'origine italienne Bruno Pontecorvo a immédiatement perçu l'intérêt de détecter ces particules mystérieuses. Malheureusement, leur énergie est faible, inférieure à 0,4 MeV, et leur détection ne peut être aujourd'hui que partielle. Dans les détecteurs au gallium, ils représentent 60 % des neutrinos accessibles. Heureusement, d'autres réactions produisent des neutrinos plus énergétiques. Les plus faciles à détecter, car leur énergie peut atteindre 14 MeV, sont les neutrinos émis par la réaction ${}^7\text{Be} + \text{p} \rightarrow {}^8\text{B} + \nu_e$ (voir *Soleil nucléaire*, encadré 1). Par contre, leur flux est 10 000 fois plus faible et leur dépendance en température est très élevée, T^{24} au centre du Soleil. Leur flux est donc fortement dépendant des conditions centrales du Soleil, car ils sont émis très près du centre de l'**étoile** (figure a). Ainsi, une erreur de 2% sur la température centrale engendre des variations d'un facteur 2 sur le flux de neutrinos associés au ${}^8\text{B}$ mesuré par les expériences Super-Kamiokande au Japon et SNO au Canada. Ces neutrinos sont très intéressants pour mieux comprendre le Soleil et le neutrino lui-même. Pendant près de 40 ans, l'estimation théorique du nombre de neutrinos émis fut supérieure au nombre de neutrinos détectés par les différentes installations, et pour certaines d'un facteur 2 à 3. Ce constat fut très stimulant car le Soleil étant une référence pour l'ensemble des étoiles, il était important de chercher à savoir s'il y avait un problème dans cette estimation. À côté des progrès que ce questionnement a apportés en physique fondamentale, l'**héliosismologie** stimula un calcul quantitatif et valida les différentes hypothèses et ingrédients du calcul. Elle donna les moyens de converger vers une prédiction étayée par les mesures sismiques (figure b). L'héliosismologie a permis aussi

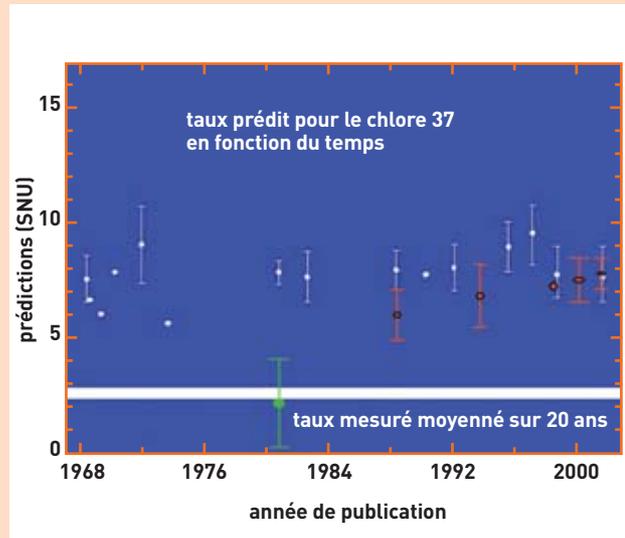


Figure b. Évolution du flux de neutrinos prédit pour le détecteur historique Homestake du chimiste américain Raymond Davis (1 SNU = 10⁻³⁶ captures/atome/s). En blanc, les prédictions du physicien américain John Bahcall et en rouge, celles du CEA utilisant les mesures sismiques pour guider les calculs du modèle solaire. La barre d'erreur verte correspond à l'incertitude de chaque série de mesures. Dans l'interaction avec ce détecteur, les neutrinos du ${}^8\text{B}$ représentent 71 % des neutrinos émis par le Soleil. La prédiction initiale qui a convaincu Raymond Davis d'entreprendre cette étude était de 22 SNU !

d'écarter des hypothèses émises pour réduire significativement la valeur de certains flux, comme un mélange des espèces dû à une **convection** centrale ou la présence de **WIMPs** (particules candidates pour la matière noire) au **cœur** du Soleil... Chaque processus, introduit dans les modèles théoriques, a pu être testé à quelques % près et, finalement, il est possible de déterminer précisément le flux de neutrinos émis par chaque réaction et d'en déduire le flux prédit pour chaque installation (tableau). Récemment, un nouvel ingrédient du modèle a changé : la composition en oxygène s'est trouvée réduite de 30 % et ceci a un impact réel sur la température centrale, mais le flux de neutrinos étant fixé par la sismologie, celui-ci n'a pas été modifié.

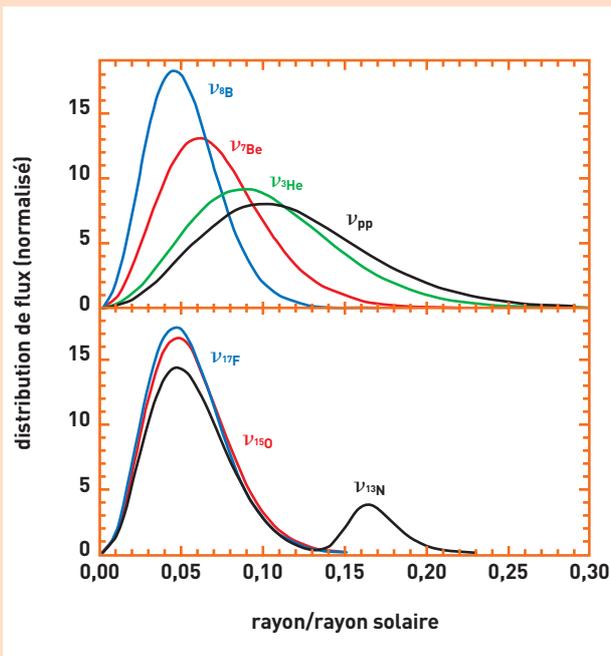
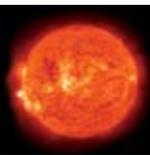


Figure a. Région d'émission des neutrinos associés aux interactions pp, $e^- + {}^7\text{Be}$, $p + {}^7\text{Be}$, ${}^3\text{He} + p$ dans le Soleil. D'autres neutrinos sont émis par le cycle CNO, liés aux éléments ${}^{13}\text{N}$, ${}^{15}\text{O}$ et ${}^{17}\text{F}$. À part ceux de la réaction fondamentale pp, ils sont tous émis très près du centre du Soleil.

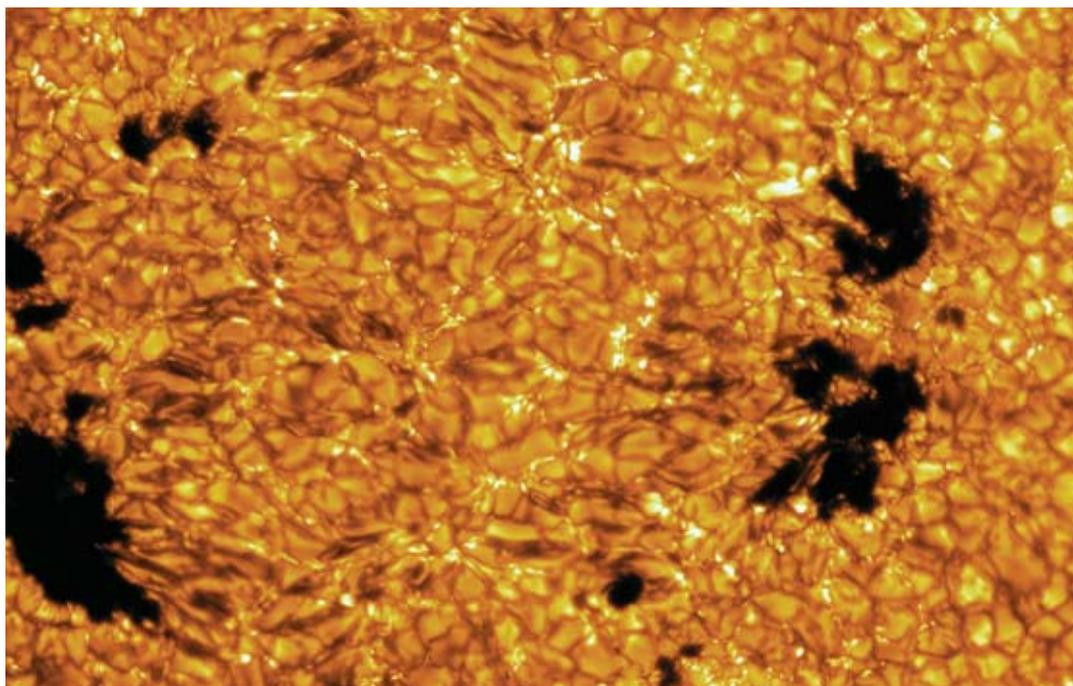
	Gallex/Sage	Homestake	Super-Kamiokande (SK)/SNO
flux prédits par le modèle sismique	127,8 ± 8,6	7,44 ± 0,96	4,95 ± 0,72 ou 5,25 (avec champ magnétique central)
flux détectés	74,7 ± 5	2,56 ± 0,23	2,4 ± 0,08 (SK) 5,09 ± 0,64 (SNO)

Les deux premiers flux s'expriment en SNU, le dernier en 10⁶/cm²/s (1 SNU = 10⁻³⁶ captures/atome/s).

L'accord avec SNO est remarquable. Ce bon accord vient de la capacité unique de ce détecteur à l'**eau lourde** de sommer les trois **savours** de neutrinos et de pouvoir inclure dans la comparaison le fait que le **neutrino électronique** se transforme en une autre saveur. En sommant ces trois saveurs, l'accord entre prédiction et détection est excellent. L'installation japonaise Super-Kamiokande à l'eau légère n'a pas cette capacité et le déficit par rapport à la prédiction est clairement visible (voir *Les neutrinos solaires, une énigme enfin résolue*). Le Soleil est un véritable laboratoire de physique complexe qui permet aussi de sonder les propriétés du neutrino.



La surface du Soleil présente un aspect granuleux. Des millions de granules de gaz portés à une température de plusieurs milliers de degrés s'agitent et induisent des ondes qui se propagent à l'intérieur du Soleil. Dans cette région apparaissent des taches sombres correspondant à des **régions actives**.



Lockheed Martin Solar and Astrophysics Laboratory/Tom Berger

En 2001, la précision sur la vitesse du son s'est avérée suffisante pour déduire d'un modèle "sismiquement" représentatif les flux de neutrinos émis par le Soleil pour les différentes réactions impliquées. Quelques mois plus tard, l'expérience SNO montrait, pour la première fois, un flux qui résultait de la somme de différentes espèces de neutrinos en parfait accord avec ces prédictions (encadré 3). La physique stellaire était devenue une science quantitative qui permettait de prédire de façon fiable les flux de neutrinos. La physique des particules a mis en évidence une propriété particulière des neutrinos: ils se transforment d'une espèce en une autre et possèdent donc une masse (voir *Les neutrinos solaires, une énigme enfin résolue*). L'interaction entre ces deux disciplines continue. Elle se concentre aujourd'hui sur le transport des neutrinos dans la matière avec de possibles interactions magnétiques ou sur des processus de résonance de **spin** qui pourraient être associés à de brusques discontinuités de la densité dans différentes régions du Soleil.

Un réseau européen se met en place pour résoudre ces nouvelles questions et aussi les suivantes liées à une autre source de neutrinos: celle des **supernovae**.

D'une vision microscopique à une vision macroscopique du Soleil

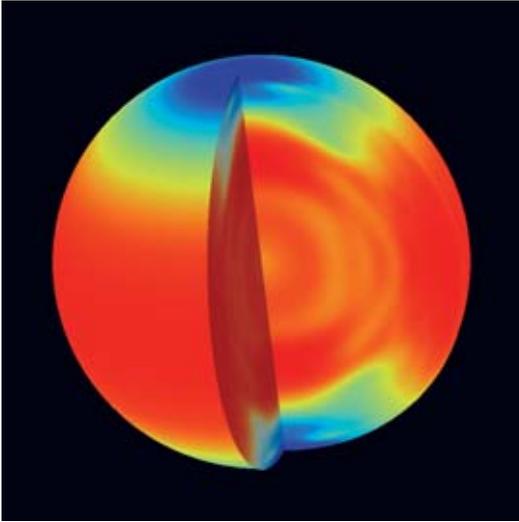
Il a fallu moins d'un siècle pour émettre des hypothèses sur le fonctionnement des étoiles, les mettre en équation, calculer l'ensemble des quantités thermodynamiques internes et les vérifier très précisément dans le cas particulier du Soleil. L'ensemble de ces travaux forme une base stable pour toutes les étoiles. La vision dite "microscopique", celle qui relève de l'infiniment petit ramené aux fantastiques dimensions de l'étoile, est maîtrisée. Dans cette représentation, l'étoile a une vie interne propre, indépendante de la vie externe agitée et **éruptive**, montrant des périodes plus calmes et d'autres plus agitées. La modélisation stellaire a été bâtie à l'économie, en ignorant

deux ingrédients essentiels: la rotation et le **champ magnétique**. En effet, comme le Soleil tourne lentement, un tour complet en 28 jours, les déformations d'asphéricité sont minimes. Cependant, ceci ne permet pas d'avoir une vision unifiée du Soleil ni de bien comprendre les étoiles jeunes et les phases d'explosion pour lesquelles la prise en compte de ces processus est indispensable. De plus, la Terre est soumise aux phénomènes de la surface solaire.

C'est pourquoi il faut dès maintenant s'attaquer à définir la vision "macroscopique" du Soleil, celle qui évolue sur des temps qui ne se chiffrent plus en milliards d'années mais en heures, en jours ou en années. L'héliosismologie va permettre ce pas conceptuel, en allant chercher sous la photosphère l'origine des phénomènes qui sont observés depuis plus de trois siècles à la surface ou au niveau de la couronne. Au XVII^e siècle, l'abbé Jean Picard, astronome et géodésien français, mesurait chaque jour le nombre de **taches** présentes à la surface du Soleil. Aujourd'hui, les scientifiques cherchent à comprendre pourquoi ces régions sombres ont un champ magnétique plus élevé que leur environnement et pourquoi elles migrent des régions polaires vers l'équateur (voir *Les simulations magnétohydrodynamiques du Soleil*). Mais d'abord, il faut mesurer ces mouvements macroscopiques internes.

La rotation de la région convective

Selon que l'onde acoustique se propage dans la direction où le Soleil tourne ou dans la direction opposée, la fréquence d'un mode va être modifiée. Au lieu d'une simple valeur, ce mode apparaîtra sous forme d'un multiplet à plusieurs composantes et la distance entre celles-ci portera l'information non seulement de la rotation de surface mais aussi de la rotation interne que l'onde traverse (voir *Les mesures sismiques solaires*). Grâce au nombre élevé de modes observés et au temps passé par les modes dans les régions les moins denses, il est possible d'extraire le profil de rotation en latitude dans la région convective (figure 3).



SOHO (ESA-NASA) - Stanford University

Image obtenue par l'instrument MDI, embarqué à bord de SOHO, montrant de façon schématique la rotation différentielle de la surface du Soleil. Les vitesses les plus élevées sont représentées en rouge et les plus lentes en bleu foncé. Il apparaît que la bande équatoriale tourne plus rapidement que les pôles.

La rotation différentielle de surface (25 jours à l'équateur et 35 jours aux pôles), clairement identifiable par les taches solaires, se retrouve dans toute la région convective. Cette constatation n'avait pas du tout été prévue théoriquement. Les scientifiques pensaient que la rotation dépendait de la distance au centre et que dans la région convective le flux de matière était laminaire⁽⁴⁾. Ce nouveau résultat, obtenu par l'expérience américaine MDI, apporte par conséquent de fortes contraintes sur l'interaction entre rotation, convection et **turbulence**. De plus, l'héliosismologie a mis en évidence une région, nommée **tachocline**, de brusque changement entre une rotation différentielle convective et une rotation rigide radiative. Cette zone correspond à un cisaillement horizontal qui induit un mélange des éléments. L'introduction de cette instabilité hydrodynamique dans les équations de structure limite la diffusion principalement gravitationnelle, précédemment décrite, et permet de parfaitement reproduire l'abondance d'hélium photosphérique obtenue grâce aux modes acoustiques, comme il est montré dans le tableau 1. Cette région de transition est donc maintenant "visible" de façon macroscopique. Elle semble d'ailleurs avoir un comportement périodique, encore non expliqué, d'un intervalle de temps de un an et quelques mois. C'est une transition, cruciale pour comprendre l'**effet dynamo** dans le Soleil, qui maintient et réorganise le champ magnétique, produisant les phénomènes cycliques et éruptifs observés à la surface du Soleil avec un changement de polarité entre pôles tous les onze ans. L'observation sismique de la rotation interne contribue ainsi à appréhender les processus dynamiques de surface.

La rotation de la région radiative

La dynamique de la région radiative est plus difficile à extraire car le nombre de modes acoustiques pénétrant cette région est plus faible, de même que le nombre de multiplets. De plus, l'excitation stochastique⁽⁵⁾ rend l'extraction de l'information difficile sur des durées d'observation limitées. Toutefois, les observations accumulées depuis vingt ans et les comparaisons instrumentales ont permis d'obtenir de façon incontestée le profil de rotation dans la région radiative. Les cinq années cumulées de données de SOHO ont offert la possibilité de n'utiliser que des modes de basse fréquence faiblement perturbés par l'excitation stochastique et les effets du **cycle solaire**. La conclusion est que la région radiative tourne de façon rigide et uniforme jusqu'au bord du cœur nucléaire avec une période d'environ 27 jours, c'est-à-dire intermédiaire entre la rotation de l'équateur et des pôles (figure 3).

(4) Flux laminaire: écoulement dans lequel les couches de fluide glissent les unes sur les autres sans échange de particules entre elles.

(5) Stochastique: qui comporte la présence d'une ou de plusieurs variables aléatoires.

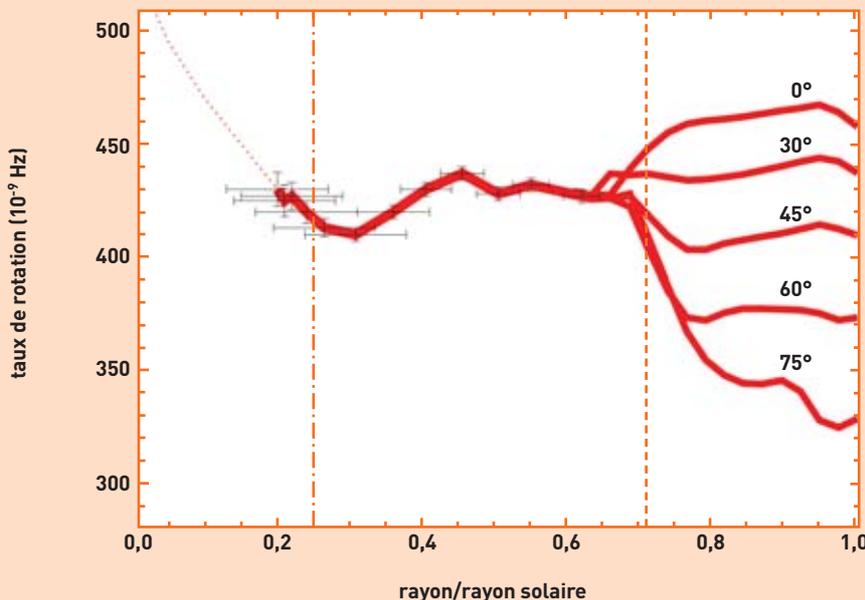
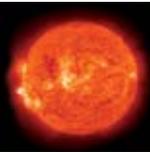


Figure extraite des expériences MDI et GOLF

Figure 3. Vitesse de rotation en fonction du rayon dans le Soleil. Vers l'extérieur, la vitesse de rotation dépend de la latitude, indiquée ici pour chaque courbe. Au-dessous de la tachocline (0,7 rayon solaire), la région radiative tourne de façon rigide et uniforme.



Sachant que les étoiles jeunes tournent beaucoup plus vite que le Soleil actuel, ce profil introduit de fortes contraintes sur la perte de moment angulaire⁽⁶⁾ au cours de la vie du Soleil. Il semble que le principal responsable d'un tel profil soit le champ magnétique. Ceci permet également de fixer une limite supérieure à sa valeur actuelle: pas plus que quelques centaines de mégagauss (MG) au centre de la région radiative.

Dans la région nucléaire, les incertitudes de mesure sont du même ordre de grandeur que l'information provenant de la région concernée. Une image complète de la rotation nécessite donc la détection de modes de gravité qui présentent une très grande sensibilité vis-à-vis de cette région. La mesure des composantes de 2 ou 3 d'entre eux permettrait déjà de répondre à plusieurs questions importantes.

Les modes de gravité

Ces ondes, principalement piégées dans la région radiative, ont un comportement évanescant dans la région convective. Aussi, leur vitesse au niveau de la photosphère est très faible, rendant très difficile leur détection. Les

(6) Moment angulaire: produit de la masse par la vitesse de rotation et par la distance à l'axe de rotation.

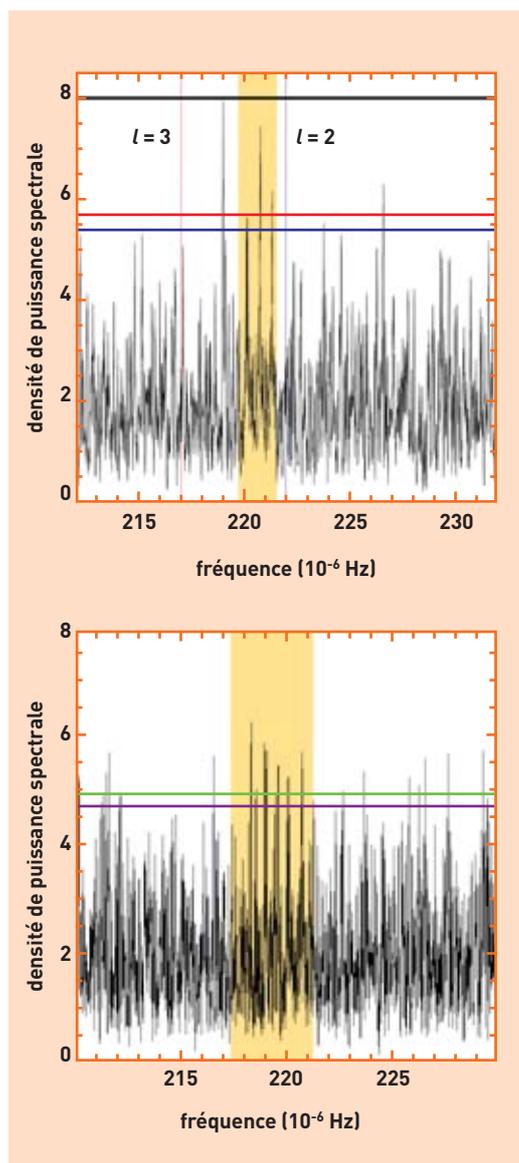


Figure 4. Un des candidats aux modes de gravité détecté à 90 % de confiance comme un triplet après 1 200 jours d'observation (figure du haut, traits orange et bleu) puis comme un quintuplet après 2 000 jours (figure du bas, traits vert et violet). Sur la figure du haut, apparaît en surimposition la position théorique de 2 modes de gravité de degrés $l = 2$ et 3 correspondant au modèle sismique.

efforts entrepris depuis vingt ans avec les réseaux d'instruments au sol se sont avérés infructueux. Le satellite SOHO est donc une opportunité exceptionnelle grâce à sa localisation au **point de Lagrange L1**, où les conditions en température et **radiation** sont très stables, à sa longévité, environ onze ans, et à la présence à son bord des trois instruments sismiques qui observent le Soleil continuellement.

Aucune détection crédible n'a été répertoriée dans la recherche de pics uniques. Celle de multiplets est plus prometteuse car elle baisse le seuil de détection et offre la possibilité d'apporter des informations sur la rotation du cœur. Les travaux actuels ont permis d'identifier, avec plus de 90 % de confiance, des structures candidates pour être des modes de gravité (figure 4). Les vitesses mesurées sont aussi petites que 2 mm/s à la surface du Soleil. Ce niveau de vitesse revient à identifier, de la Terre, une cerise qui oscillerait à la surface de la Lune. Par conséquent, les conditions d'observation pour une telle recherche sont très importantes. En fait, au point de Lagrange, le principal perturbateur est le Soleil lui-même, car la granulation de surface et l'activité solaire perturbent la mesure. C'est pourquoi les astrophysiciens du CEA ont bon espoir de confirmer ou d'infirmer ces potentielles détections en Soleil calme avant l'arrêt de SOHO prévu en 2007, dès que l'activité solaire va décroître (le maximum était en 2001). Les signatures identifiées actuellement correspondent à des signaux présents pendant 5 ans. S'ils étaient avérés, ils révéleraient un cœur central à rotation rapide avec un axe d'inclinaison différent du reste de l'étoile. Ce résultat constituerait une nouvelle page d'histoire solaire car le cœur nucléaire aurait conservé un vestige des conditions initiales. C'est à la fois un champ d'investigation passionnant pour les années à venir et également une opportunité pour tous les ingénieurs et techniciens de transformer l'essai en construisant une nouvelle génération d'instruments encore plus performants pour mesurer la dynamique temporelle du cœur nucléaire...

Vers une modélisation à différentes échelles

Les astrophysiciens du CEA s'orientent aujourd'hui vers une **modélisation** des différentes échelles de l'histoire d'une étoile, à travers les simulations numériques sur de gros **calculateurs massivement parallèles**. Cependant, d'autres projets spatiaux se dessinent, en particulier le programme ILWS (*International Living With a Star*) et le satellite européen Solar Orbiter, où des collaborations américaines et européennes peuvent se nouer. L'ensemble des processus microscopiques et macroscopiques sera alors quantitativement mesuré et mis en équation. Pour des raisons évidentes de connaissance intime du plasma solaire, les équipes du CEA se sont fortement mobilisées au cours des vingt dernières années et resteront des acteurs majeurs de cette page de l'histoire des Sciences.

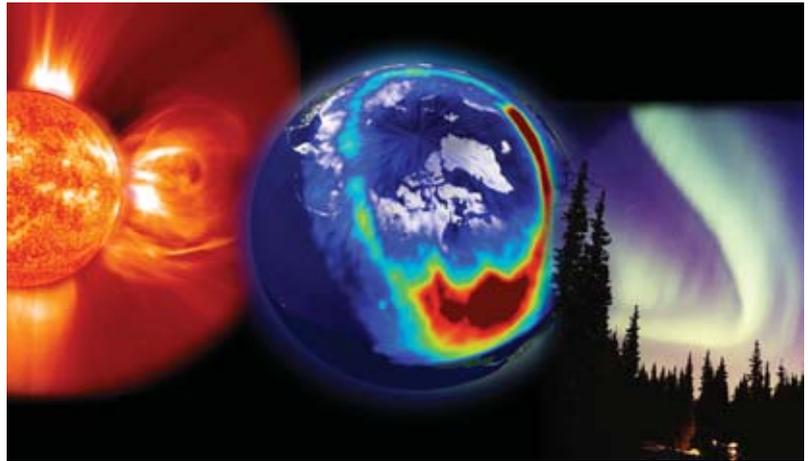
La relation entre le Soleil et la Terre

Le Soleil interagit avec la Terre, et les particules émises lors de fortes **éruptions** peuvent perturber les installations électriques ou les véhicules en orbite. S'il est bien établi que la température moyenne de la Terre, environ 16 à 17 °C, est directement liée à l'énergie émise par le Soleil, le rôle de ce dernier dans le climat actuel est encore mal connu. Sur les 1 365 W/m² émis,

Turck-Chièze et al. in *Astrophysical Journal*, 20 mars 2004.

l'apport au sol est finalement de 242 W/m^2 . Des variations cycliques de la température terrestre ont été constatées dans le passé et sont directement imputées à des effets orbitaux de la Terre autour du Soleil (voir *Le Soleil a rendez-vous avec la Terre*). La question d'actualité est de savoir s'il existe d'autres sources de variation venant du Soleil. Depuis que le Soleil brûle de l'hydrogène, la luminosité solaire a augmenté de 30 % en 4,6 milliards d'années et donc, à l'échelle humaine, les changements attendus sur cent ans sont négligeables. C'est pourquoi les scientifiques parlent de "constante solaire", laquelle depuis plus d'une dizaine d'années est mesurée de façon systématique. Il a été observé une variation d'énergie de l'ordre du watt au cours du cycle de 11 ans. Ce phénomène est en partie dû à une redistribution de l'énergie dans la zone convective, sous forme d'énergie magnétique et d'énergie mécanique, accompagnée de mouvements de matière ainsi qu'à la présence de **facules** près des taches solaires.

Plusieurs questions commencent à être soulevées. Comment la rotation différentielle évolue-t-elle avec le temps? Comment varie l'énergie magnétique qui s'échappe du Soleil? A-t-elle varié d'un facteur 2 en 100 ans, comme semblent le suggérer les mesures actuelles? Cela a-t-il un impact sur le climat? Quelle est la véritable interaction des particules chargées émises lors des **éjections de masse coronale** avec la **magnétosphère** terrestre? Ces particules modifient-elles significativement la composition des nuages en haute atmosphère? Il n'est pas pour le moment possible de répondre à ces questions, mais l'ensemble des techniques utiles pour apporter des éléments de réponse existe. Pourtant, il semble aussi raisonnable de penser qu'une évolution climatique récente est imputable aux émissions terrestres qu'il est donc urgent et important de limiter. Certaines observations cruciales viendront des instruments à bord de SOHO et des quatre satellites Cluster qui étudient la magnétosphère terrestre. La stratégie d'observation est aujourd'hui définie et le support théorique et numérique se met en place (voir *Les simulations magnétohydrodynamiques du Soleil*) pour répondre à ces



SOHO (ESA-NASA)

questions à l'échelle de dix à vingt ans. Une réalité est que le Soleil a un impact important sur les communications et la technologie de plus en plus sensible qui est développée. SOHO est le premier satellite qui renseigne, chaque jour, sur la "météorologie solaire", avec le descriptif de la vitesse de ses vents, ses éjections de matière qui peuvent être associées 2 à 3 jours plus tard sur Terre aux mouvements de notre magnétosphère et aux **aurores boréales**⁽⁷⁾. Les astronautes et les pilotes ne sont certainement pas les seuls à s'en préoccuper...

L'activité solaire, qui perturbe les télécommunications et provoque d'inhabituelles aurores boréales, pourrait avoir des incidences plus importantes sur Terre, comme modifier le climat ou induire des périodes glaciaires.

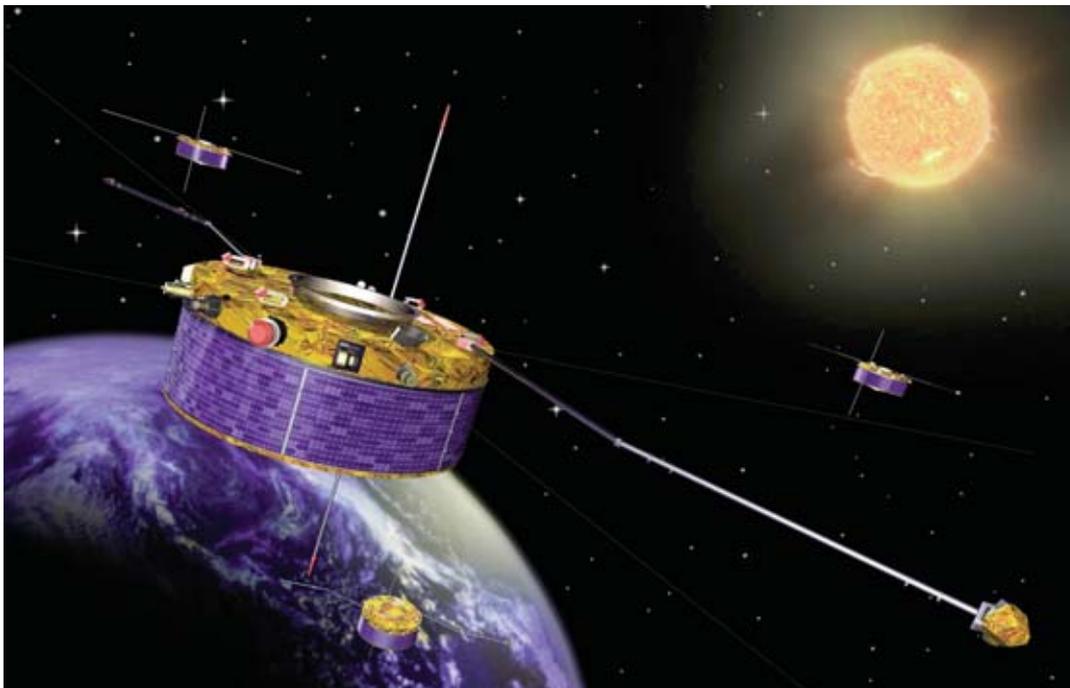
> **Sylvaine Turck-Chièze**

Direction des sciences de la matière
CEA centre de Saclay

(7) Voir le site <http://sohowww.estec.esa.nl/>

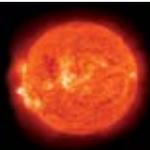
POUR EN SAVOIR PLUS

Encyclopedia of Astronomy and Astrophysics,
Institute of Physics Publication, 2000 ; Jean-Paul
ZAHN, *The Solar Interior*, p. 2417 ; Sylvaine TURCK-
CHIÈZE, *Solar Interior: Standard Models*, p. 2609.



ESA

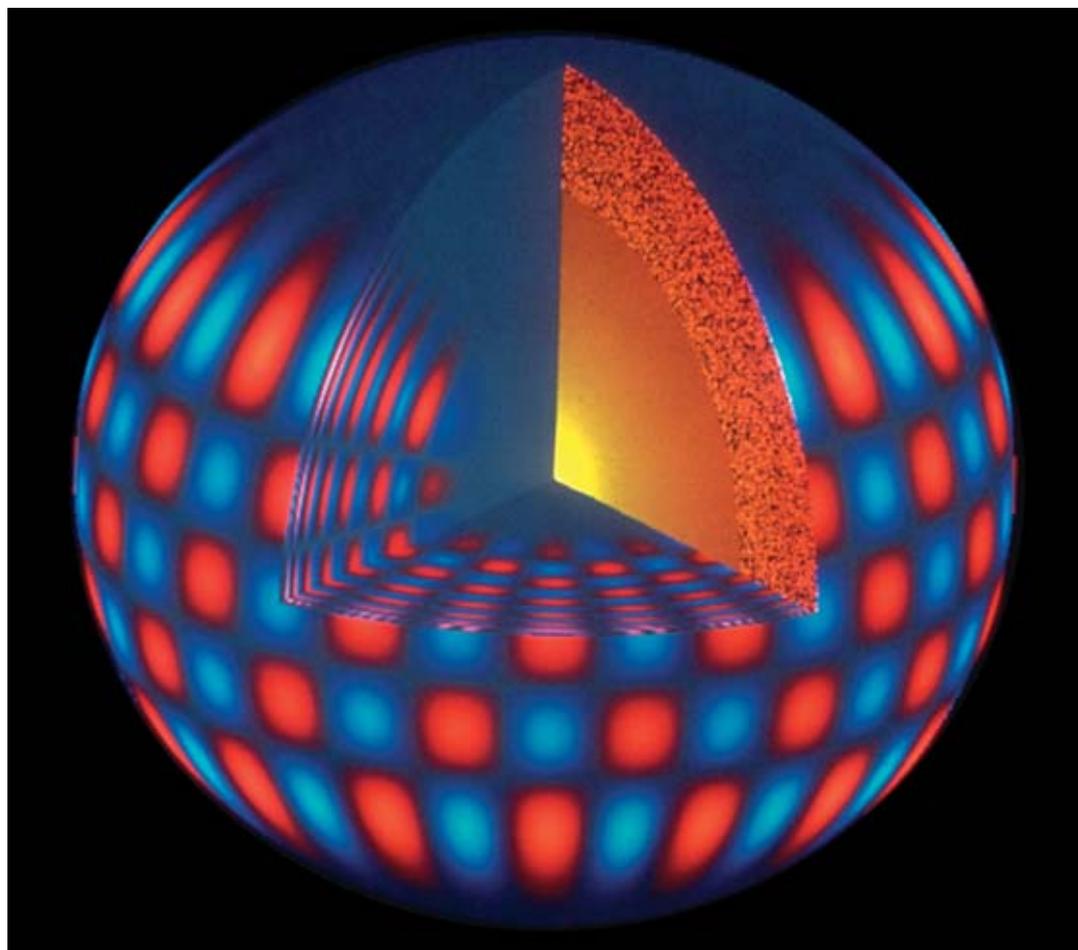
Les quatre satellites européens Cluster, lancés en 2000, ont pour mission d'étudier la magnétosphère terrestre et les interactions du vent solaire et des éjections de masse coronale avec celle-ci.



Les mesures sismiques solaires

Devenue en quelques décennies discipline à part entière de l'astrophysique, l'héliosismologie permet d'étudier quasiment en direct l'intérieur du Soleil, les ondes acoustiques ne mettant qu'une heure environ pour se propager entre le cœur et une surface désormais observée en permanence.

Le mouvement permanent observé à la surface du Soleil est dû à la combinaison de millions de modes d'oscillation différents. Chaque mode est caractérisé par le nombre de fois où l'onde se réfléchit à la surface du Soleil. La figure représente schématiquement un mode d'oscillation, où apparaissent en bleu les régions qui se déplacent vers l'observateur et en rouge celles qui s'en éloignent.



NSO/JURA/NSF

L'étude de l'intérieur du Soleil ne peut se faire en utilisant le **rayonnement électromagnétique** émis par la surface solaire. Certes, cette lumière ne met que 8 minutes pour parvenir à la Terre, mais cela lui aura auparavant demandé plusieurs millions d'années pour traverser les 700 000 km qui séparent le centre du Soleil de la **photosphère**, en raison de l'extrême **opacité** du matériau traversé. La lumière reçue, après un si long voyage, a donc perdu toute l'information sur ses origines et sur les couches rencontrées. L'exploration de l'intérieur solaire est pourtant rendue possible par l'existence d'ondes acoustiques qui se propagent de la surface jusqu'au **cœur**, et ce en une heure environ. La première observation de ces ondes date de 1962, mais il faudra attendre les années 70 pour que leur nature soit comprise et qu'une nouvelle discipline centrée sur leur étude émerge : l'**héliosismologie**.

La génération des ondes

L'astrophysicien rencontre un problème similaire à celui des géophysiciens quand ils veulent étudier l'intérieur de notre planète. Les sismologues "terrestres" utilisent les ondes sismiques qui la traversent comme

source d'informations sur la structure interne de la Terre. Les ondes sismiques dites *ondes P* sont de même nature que les ondes sonores : ce sont des ondes qui se propagent en compressant puis décompressant tour à tour le milieu dans lequel elles évoluent. Les sismologues parlent donc d'ondes de pression, d'ondes acoustiques ou encore d'ondes sonores. Les ondes acoustiques solaires sont aussi dénommées *ondes P*. Cependant, il n'y a pas de croûte solide à la surface du Soleil capable de craquer suite aux déformations engendrées par les séismes. Au contraire, la photosphère solaire oscille localement sous l'action des ondes qui s'y réfléchissent. Ce sont ces oscillations de la photosphère qui sont détectées. Elles renseignent sur les ondes se propageant dans le Soleil.

L'excitation de ces ondes acoustiques est due à la **convection**. Dans les 30 % les plus externes en rayon du Soleil, le **plasma** est violemment agité par des mouvements macroscopiques de matière, ou mouvements convectifs. L'énergie produite par **fusion** nucléaire au cœur, et qui permet au Soleil de briller, n'est pas transmise uniquement par rayonnement électromagnétique : la convection en transporte l'essentiel dans cette région qu'il est convenu d'appeler **zone convective**.

Ces mouvements convectifs créent la fameuse **granulation** de surface qui s'observe nettement aux télescopes, et qui donne cet aspect "peau d'orange" à la photosphère. Ces mouvements sont similaires à ceux qui agitent l'eau bouillante d'une casserole en train de chauffer. Les cellules convectives du Soleil "frappent" sa surface et génèrent ainsi des ondes acoustiques qui vont ensuite se propager dans l'intérieur de l'étoile, de la même manière que les gouttes de pluie qui martèlent la peau d'un tambour produisent du son. À l'inverse des ondes électromagnétiques, ces ondes sonores se propagent de la surface vers le cœur du Soleil, et parcourent ce trajet en un peu moins d'une heure (*rayon acoustique*), renseignant sur le Soleil quasiment en "temps réel". Cela vient de ce que la vitesse du son dans le Soleil, proportionnelle à la racine carrée de la température, varie de 7 km/s près de la surface à 510 km/s dans le cœur : cette vitesse est élevée au regard de ce qu'elle vaut sur Terre (à peine 340 m/s dans l'air).

Analogie musicale

Le Soleil est un formidable instrument de musique. De même qu'une corde de piano ne produit que des sons ayant certaines fréquences précises (le fondamental et ses harmoniques), seules certaines ondes sont "autorisées" dans le Soleil, qui agit comme une cavité de résonance. Les ondes ayant les fréquences appropriées constituent les *modes d'oscillation* qui vibrent plusieurs jours durant, voire plusieurs années (ce sont des ondes stationnaires). Les autres sont appelées à disparaître rapidement. La convection, telle un marteau de piano qui frappe la corde, est la source d'excitation de ces modes. Prenons cette fois-ci l'exemple d'un trombone. Le musicien, en ajustant grâce à la coulisse la longueur de la colonne d'air dans l'instrument, produit des sons de fréquences différentes. Plus cette longueur est importante, plus le son est grave. Quiconque se représentant le Soleil comme une cavité dans laquelle des ondes sonores évoluent, et dont le volume est un million trois cent mille fois plus important que celui de la Terre, comprend instinctivement que ses ondes acoustiques aient des fréquences très basses.

Ainsi, le Soleil produit des ondes sonores décalées de 17 octaves par rapport à la note *la* centrale du piano de fréquence 440 Hz, c'est-à-dire des ondes de fréquences centrées autour de 3 mHz (période de 5 minutes). De la même façon, pour reconnaître une pièce musicale, ses interprètes et les instruments de musique utilisés, quelques minutes sont nécessaires. Par analogie, dans le cas du Soleil, comme ses fréquences sont environ 150 000 fois plus graves, il faut en fait "écouter" beaucoup plus longtemps pour pouvoir commencer à extraire de l'information, de l'ordre d'une année "d'écoute" continue.

Caractérisation des modes d'oscillation d'une sphère

Le Soleil est cependant bien plus complexe qu'un instrument de musique, principalement parce qu'il est tridimensionnel et sphérique. Les modes d'oscillation ne peuvent dès lors pas être caractérisés par un unique nombre, mais en nécessitent deux, dénommés

n (ordre radial) et l (degré du mode). L'ordre n représente le nombre de nœuds radiaux, c'est-à-dire le nombre de fois où l'amplitude de l'onde s'annule entre la surface et le centre du Soleil. Le **degré** l correspond au nombre de lignes nodales à sa surface, c'est-à-dire au nombre de fois où le mode se réfléchit à la surface du Soleil. Dans le cas d'une corde de guitare fixée à ses deux extrémités, ses modes d'oscillation sont entièrement définis par la seule donnée de n correspondant au fondamental et ses harmoniques. De plus, le Soleil tourne sur lui-même et a donc un axe préférentiel de symétrie qui est son axe de rotation. Pour caractériser complètement les oscillations, cet axe impose d'introduire un nombre supplémentaire, l'ordre azimutal m qui représente le nombre des lignes nodales à la surface perpendiculaires à l'équateur (figure 1).

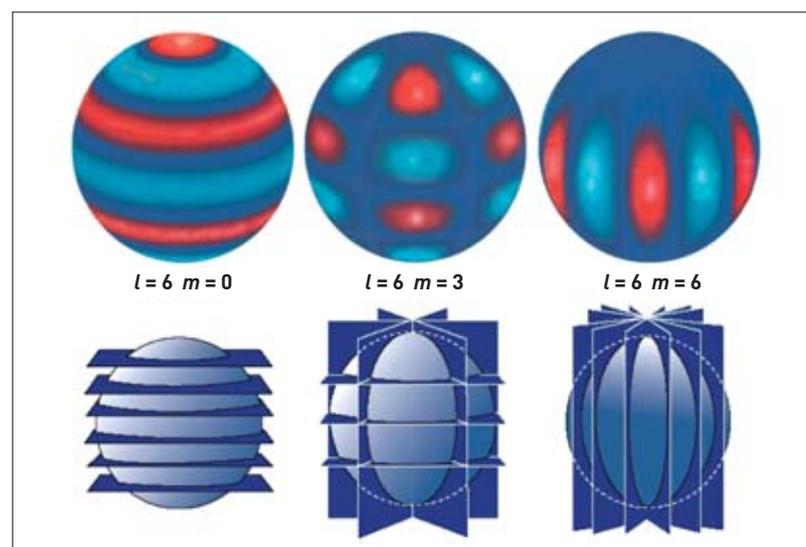
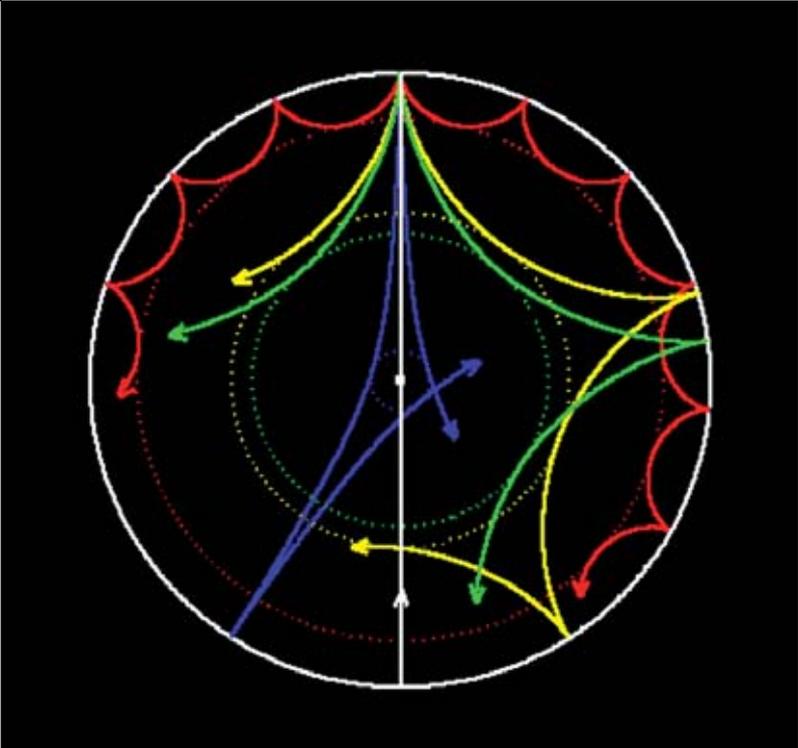


Figure 1. Exemple de 3 modes d'oscillation.

La propagation des ondes acoustiques

Les ondes sonores informent sur la structure et la physique du Soleil. À cette fin, plusieurs grandeurs sont utilisées : la fréquence des ondes, leur amplitude, leur taux d'amortissement, c'est-à-dire la quantité d'énergie perdue chaque seconde, qui détermine leur durée de vie. L'information que ces ondes transportent dépend également de leur trajectoire dans le Soleil. Elles sont générées à la surface du Soleil par les mouvements convectifs et se propagent alors vers le centre de l'étoile.

La température augmente au fur et à mesure que les ondes s'approchent de ce centre et elles sont progressivement réfractées (leur trajectoire s'incurve) jusqu'à être complètement réfléchies. Cette réfraction vient de ce que la vitesse de déplacement des ondes sonores dépend de la température du milieu dans lequel elles évoluent. Une fois réfléchies, les ondes reviennent vers la surface qu'elles atteignent à une position différente de leur point de départ, puis elles repartent vers l'intérieur, et ainsi de suite. Elles peuvent effectuer des "tours complets" du Soleil. Cette représentation de leur propagation n'est cependant qu'approximative puisque les ondes considérées sont en réalité sphériques. La création de modes d'oscillation depuis de telles ondes sonores se comprend grossièrement de la manière suivante : l'excitation des ondes par les mouvements convectifs étant permanente, une onde qui a "fait un tour du Soleil"



La propagation des ondes acoustiques. Certaines ondes plutôt tangentielles restent près de la surface et se réfléchissent en de nombreux points de la sphère. D'autres plus radiales atteignent le centre du Soleil.

et revient à son point de départ interagit avec une onde nouvellement excitée. Cette interférence peut être constructive ou destructive. Soit l'onde incidente renforce l'onde qui vient d'être excitée, soit les deux s'annihilent mutuellement. Seules les oscillations ayant les bonnes fréquences donnent naissance aux interférences constructives et deviennent des modes d'oscillation. Ces interférences constructives garantissent une durée

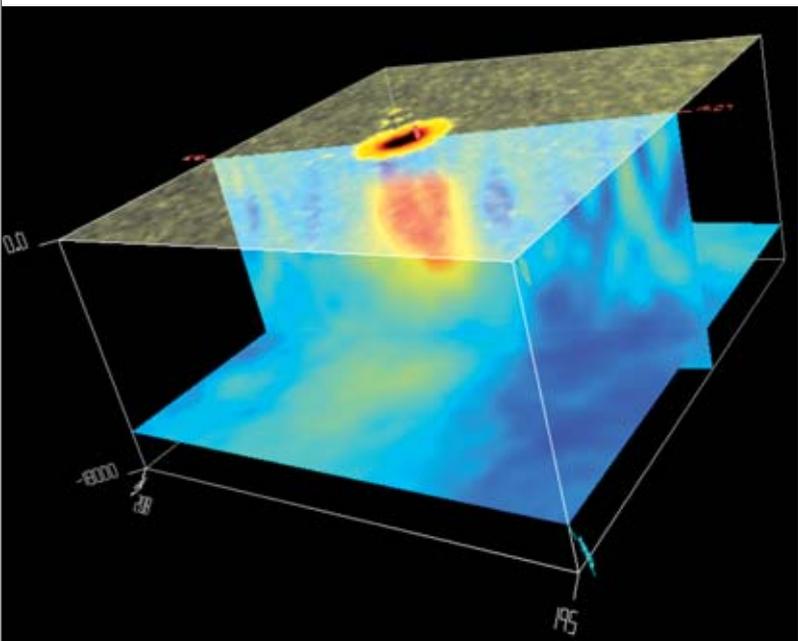


Figure 2. Profil de vitesse du son sous une tache solaire obtenu par l'instrument MDI. Les régions où la vitesse du son est plus élevée apparaissent en rouge et celles où la vitesse du son est plus lente en bleu.

de vie "décente" à ces modes, au contraire des autres ondes appelées à vite disparaître. Les modes sont piégés dans une cavité limitée à l'extérieur par la surface solaire et à l'intérieur par une sphère centrée sur le centre du Soleil et de rayon égal à la distance à laquelle le mode est réfléchi (*point de retournement interne*). Si chaque mode est caractérisé par son degré l et son ordre n , alors plusieurs milliers ont été détectés avec précision à la surface du Soleil. L'intérêt d'un tel nombre est que, chaque mode se propageant selon un "chemin" différent dans le Soleil, plus les chercheurs ont accès à un grand nombre de modes d'oscillation, plus la couverture de l'intérieur solaire est complète. En l'absence de certains modes, il reste des régions solaires qui ne peuvent être atteintes. À un degré l donné, plus un mode a un ordre radial n élevé, plus il s'enfonce profondément dans le Soleil avant d'être réfléchi (*point de retournement interne* plus près du cœur). De même, à n donné, plus l est faible et plus le point de retournement interne est proche du centre solaire (encadré).

Des ondes à la structure interne

La méthode la plus employée pour retrouver la structure interne du Soleil, à partir d'un nombre suffisant de modes observés, est appelée *problème inverse*. Les physiciens opèrent de la façon suivante : ils disposent, par exemple, des fréquences de modes d'oscillation (résultat d'observations) et également d'un modèle solaire calculé sur ordinateur et suffisamment représentatif du Soleil réel. En utilisant ce modèle solaire, ils prédisent les fréquences des modes d'oscillation observés. Il existe une relation entre la différence entre fréquences observées et prédites, et les différences entre vitesses du son du Soleil et du modèle, et entre densités du Soleil et du modèle. Des techniques mathématiques leur permettent d'inverser cette relation, et donc de retrouver les profils réels de vitesse du son et de densité dans l'intérieur de notre étoile. En faisant ensuite une hypothèse sur la relation entre la pression, la densité et la température (équation d'état), ils déduisent le profil de température du Soleil. L'observation des modes d'oscillation donne également accès au profil de rotation du Soleil. Actuellement, il n'est pas encore possible de retrouver la structure solaire dans ses 7 % les plus internes en rayon (15 % de la masse), ainsi que la rotation dans les 20 % les plus internes (cœur nucléaire). Depuis une décennie, une branche de l'héliosismologie qui concerne la structure solaire locale se développe. L'utilisation des modes d'oscillation (dits *globaux*) ne peut fournir qu'une information moyennée en longitude, et bien souvent également moyennée en latitude. L'*héliosismologie locale*, contrairement à cette *héliosismologie globale*, est fondée sur l'observation de la propagation locale d'ondes. Elle permet d'étudier des structures localisées comme les **taches solaires** (figure 2). Ces deux branches de l'héliosismologie sont complémentaires plutôt qu'antagonistes.

➤ **Sébastien Couvidat et Rafael García**
Direction des sciences de la matière
CEA centre de Saclay

L'instrument spatial GOLF : un spectromètre à résonance

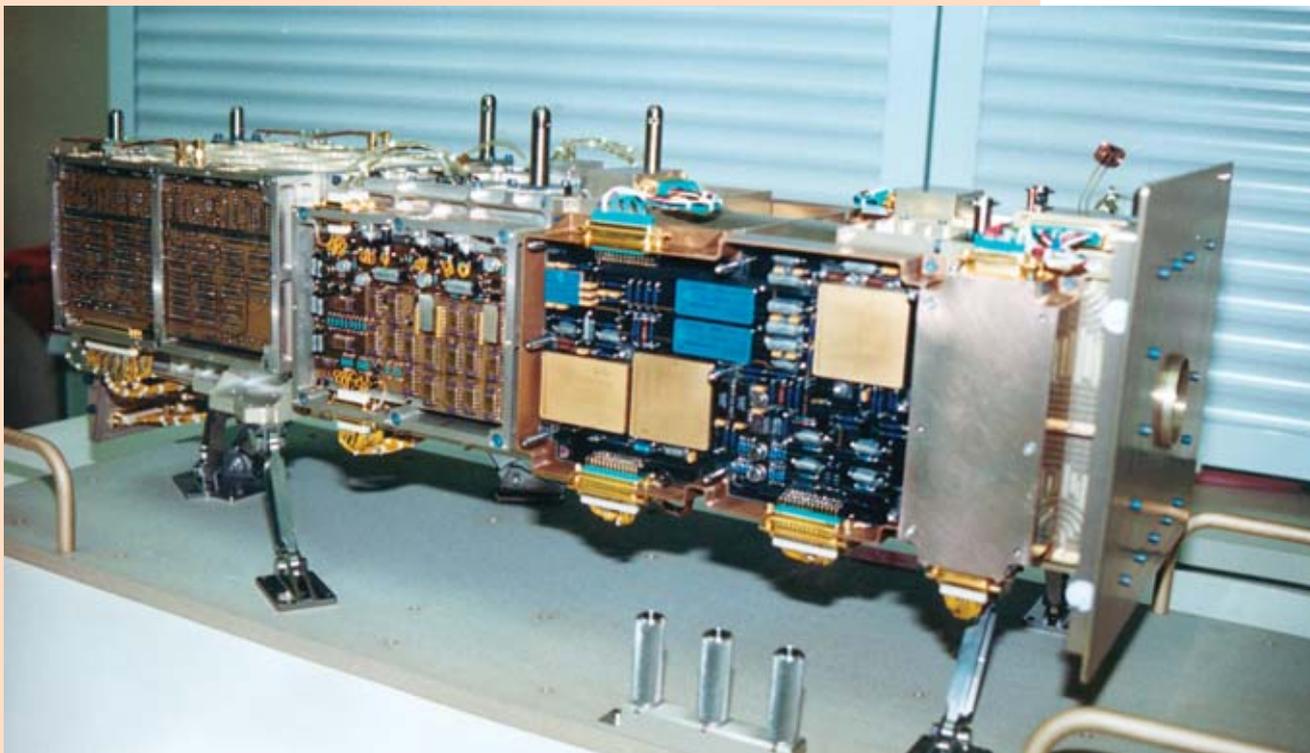
La meilleure façon de connaître les ondes internes pénétrant jusqu'au cœur du Soleil est d'employer un **spectromètre** à résonance. Il enregistre les variations périodiques de la vitesse Doppler (encadré B, *Des spectres qui en disent long*, p. 17). Dans le cas de GOLF (*Global Oscillations at Low Frequencies*), installé à bord de la sonde spatiale SOHO (*Solar and Heliospheric Observatory*), ce sont les vitesses de déplacement des **raies** du sodium formées à environ 500 km au-dessus de la **photosphère** qui sont exploitées. L'interférence de l'ensemble des modes acoustiques est détectée en surimpression de la vitesse de déplacement du Soleil par rapport à l'observateur. Puis, par transformée de Fourier, le spectre de fréquence est obtenu (voir *Vision statique et dynamique de l'intérieur solaire*). Après avoir filtré la lumière solaire autour des **longueurs d'onde** du sodium (589 nm), les détecteurs comptent les **photons** qui ont résonné avec ceux d'une cellule contenant du sodium gazeux à environ 200 °C. Ce phénomène atomique permet de définir un très fin pinceau dans la raie du sodium. En choisissant la **polarisation** d'entrée et en plaçant cette cellule dans un **champ magnétique** de 4 kG, une mesure est effectuée sur le flanc gauche de la raie, puis en changeant de polarisation, sur le flanc droit. De la dissymétrie du comptage est extraite la vitesse Doppler entre le Soleil et l'instrument. Une mesure régulière (toutes les 10 s) offre la possibilité d'étudier les fluctuations de cette vitesse et d'en déduire la fréquence de

chaque mode. Plus la mesure est répétée, plus la précision de la mesure est grande puisqu'elle est donnée par l'inverse du temps d'observation. Il convient donc de suivre continuellement le Soleil, soit avec des instruments placés en réseau autour de la Terre (réseau français IRIS), soit en satellisant un instrument comme GOLF et en le plaçant au **point de Lagrange L1**. Après plusieurs années d'observations, la précision sur les fréquences est de quelques 10^{-5} et la vitesse du son est extraite à mieux que 10^{-3} près, ce qui permet de connaître les processus physiques à quelques %.

Un nouvel instrument est en construction au Département d'astrophysique, de physique des particules, de physique nucléaire et de l'instrumentation associée (Dapnia) du CEA, entre les services d'astrophysique (SAP), d'électronique, des détecteurs et d'informatique (SEDI) et d'ingénierie des systèmes (SIS), en collaboration avec les observatoires de Bordeaux et de Nice et l'Institut d'astrophysique des Canaries (IAC). Le but est d'améliorer encore d'un facteur 10 la sensibilité de l'instrument afin de mesurer un grand nombre de modes de gravité et leur variation temporelle. L'objectif est d'atteindre des vitesses superficielles de 0,1 mm/s.

> Sylvaine Turck-Chièze

Direction des sciences de la matière
CEA centre de Saclay



Institut d'astrophysique spatiale

L'instrument spatial GOLF a été réalisé par l'Institut d'astrophysique spatiale d'Orsay, le Dapnia au CEA, l'Institut d'astrophysique des Canaries (Espagne), et les Observatoires de Bordeaux et de Nice : une cinquantaine de scientifiques, d'ingénieurs et de techniciens y ont participé. Il sert à étudier la structure interne du Soleil en mesurant le spectre des oscillations globales dans le domaine de fréquence s'étendant de 10^{-7} à 10^{-2} Hz.



Les simulations magnétohydrodynamiques du Soleil

Simuler en trois dimensions la machine électromagnétique à l'œuvre au sein du Soleil est désormais à la portée des chercheurs et de leurs supercalculateurs.

Boucles magnétiques dans la couronne solaire. La topologie complexe des structures magnétiques dans la haute atmosphère solaire facilite les reconnections des lignes de champ et génère des éruptions.



Lockheed Martin Solar and Astrophysics Laboratory

De par sa proximité, le Soleil a une influence forte et directe sur la Terre et notre société technologique. En particulier, son activité magnétique et son **vent** de particules chargées perturbent l'environnement spatial autour de notre planète allant jusqu'à endommager nos satellites, voire, dans le cas d'**éruptions solaires** extrêmes, nos centrales électriques. Afin de pouvoir prédire et anticiper de tels phénomènes, il est nécessaire de comprendre l'origine de ces processus physiques. Aujourd'hui, il est admis que ces phénomènes dynamiques sont reliés à une **dynamo turbulente** interne distribuée dans et à la base de la **zone convective** solaire. Une approche prometteuse pour tester cette interprétation consiste à simuler de façon tridimensionnelle cette région du Soleil sur de gros calculateurs comme ceux du CEA au Centre de calcul recherche et technologie (CCRT) de Bruyères-le-Châtel (Essonne).

Enjeux et défis de la modélisation dynamique du Soleil

Le Soleil est une grosse boule de gaz chaud et **ionisé (plasma)** tournant sur elle-même en 28 jours environ. Les 30 % les plus externes en rayon sont animés en permanence de mouvements **convectifs**. Ces mouvements sont turbulents et chaotiques et ils subissent l'influence des forces de Coriolis et de Laplace (voir les encadrés 2 et 3), ce qui conduit à un large éventail de phénomènes magnétiques. Pour comprendre la dynamique turbulente et l'activité magnétique du Soleil, pouvoir l'anticiper et se protéger de ses incidences sur Terre, il est nécessaire de disposer d'un modèle physique de son **intérieur** et de son **atmosphère** (encadré A, *Toute la lumière sur le Soleil*, p. 13). Le modèle actuel des couches dynamiques

externes repose sur la théorie de la dynamique des fluides et des plasmas (fluides conducteurs), aussi appelée magnétohydrodynamique (MHD). Cette théorie décrit le fonctionnement mécanique, hydrodynamique, thermodynamique et magnétique du plasma turbulent solaire à partir d'équations aux dérivées partielles non linéaires et couplées. Malheureusement, de tels systèmes d'équations n'ont probablement pas de solutions mathématiques exactes (analytiques) permettant de résoudre totalement le problème posé par la turbulence et l'activité solaire, si aucune hypothèse simplificatrice n'est considérée. Cette difficulté persiste depuis plus de 50 ans et constitue un des défis majeurs de l'astrophysique moderne et plus particulièrement de la dynamique des fluides astrophysiques. Il est donc nécessaire de développer des approches complémentaires pour progresser dans notre compréhension de ces phénomènes⁽¹⁾. Il convient tout d'abord de simplifier plus ou moins fortement le système étudié pour pouvoir le traiter analytiquement, ou de développer un programme informatique résolvant le système le mieux possible par approximation numérique. Enfin, il est possible de cumuler ces deux approches pour analyser un à un chaque aspect du problème.

Il est certain que l'apparition de **calculateurs massivement parallèles**, avec une puissance de calculs de plus en plus impressionnante (des dizaines de milliers de milliards d'opérations élémentaires par seconde ou Teraflops), encourage le développement de **codes** performants les plus réalistes possibles décrivant la magnétohydrodynamique des **étoiles** dont le Soleil, voire du système Soleil-Terre.

(1) À ce sujet, voir *Clefs CEA* N° 47, Hiver 2002-2003, pp. 10-12 et 18-19.

La convection thermique

Le magnétisme solaire est de nature différente à l'intérieur de notre étoile, où le **champ magnétique** est entraîné par les mouvements, et dans son atmosphère, où le champ magnétique dicte la dynamique. Pour cette raison, la **modélisation** de la magnétohydrodynamique du Soleil a été séparée en physique solaire *interne* et *externe*. Très récemment, des synergies sont apparues afin d'intégrer dans un protocole plus large tous les développements dans le domaine de la simulation MHD du Soleil. Il reste cependant encore beaucoup d'efforts à accomplir avant d'arriver à un modèle complet.

Voici un rapide panorama de l'état actuel des simulations multidimensionnelles en se limitant à la convection turbulente, c'est-à-dire interne, du Soleil. La principale raison de ce choix est que la dynamique atmosphérique du Soleil doit en partie son existence et sa variabilité à son couplage fort avec la dynamique interne. Ceci est particulièrement vrai du **cycle** de 22 ans d'activité magnétique et d'émergence des **taches solaires** (voir plus loin "Propriétés et rôle du champ magnétique").

Pour étudier la convection solaire, deux approches parallèles et complémentaires ont été menées. L'une modélise de façon locale dans une géométrie cartésienne à très haute **résolution** une portion réduite de la convection de surface solaire. L'autre s'attaque à la modélisation globale en géométrie sphérique à résolution plus modeste de l'ensemble de la zone convective (excepté les couches superficielles). La première méthode permet de décrire plus correctement la turbulence solaire et les propriétés microscopiques du plasma, au détriment de l'usage de la bonne géométrie et de la présence d'écoulements moyens globaux. La seconde a l'avantage d'ébaucher un modèle de circulation "générale" dans le Soleil, comme ceux développés pour prédire le climat. C'est cette deuxième approche qui sera décrite ici.

Simulations numériques globales de la convection turbulente solaire

Le Soleil présente un aspect **granuleux** qui provient des mouvements convectifs turbulents transportant la chaleur vers sa surface (encadré 1 et voir l'illustra-

C'est le processus de transport de l'énergie thermique par le mouvement d'un fluide. Ce qui est chaud monte et ce qui est froid descend. Un exemple courant est celui d'un récipient d'eau posé sur une source de chaleur (plaque électrique, réchaud à gaz...). L'eau chauffée au fond du récipient est plus légère et monte à la surface, s'y refroidit et retombe, se réchauffe à nouveau, remonte, etc. Ce mouvement **convectif** tend à réduire la différence de température entre le fond et la surface du récipient. Dans le cas des **étoiles**, les mouvements convectifs servent à évacuer l'énergie nucléaire produite en leur centre. La localisation des zones de convection dépend fortement de la masse des étoiles, les plus massives ayant une convection centrale. Quand il y a une forte variation de la densité, comme dans les enveloppes convectives de type solaire, l'entropie⁽¹⁾ du fluide devient la variable naturelle pour caractériser l'efficacité de la convection, une convection très efficace étant quasi-**adiabatique** (sans perte de chaleur). Dans la nature, le transport de l'énergie thermique peut également se faire par **conduction** (contact direct entre un corps chaud et un corps froid) ou par rayonnement (énergie transportée par les **photons**). Dans les étoiles de type solaire, la conduction joue un rôle négligeable par rapport au rayonnement, qui domine du centre jusqu'à 0,71 rayon solaire, et à la convection, qui domine entre 0,71 et presque 1 rayon solaire.

(1) L'entropie est la quantité physique qui mesure le degré de désordre d'un système comme, par exemple, la dégradation de l'énergie.

tion page 22). Le large intervalle d'échelles spatiales et temporelles de la zone convective est d'environ 6 ordres de grandeur par dimension. Il rend la modélisation numérique⁽¹⁾ de la convection turbulente solaire très difficile même sur les ordinateurs actuels. Il n'est donc pas encore possible de modéliser la granulation solaire avec l'approche globale discutée ici. Cependant, au gré des développements des ordinateurs, la résolution utilisée par les codes hydrodynamiques modernes atteint aujourd'hui un maillage de 4000 km de côté et 1000 km de profondeur, donc s'approchant de plus en plus de l'échelle spatiale de la granulation.

Les résultats de telles simulations numériques sont montrés figure 1. Le mouvement convectif (vitesse radiale/verticale) d'une sphère de gaz en rotation est représenté à trois instants successifs. Il apparaît clairement que les lignes de flots descendants (en

(1) À ce sujet, voir *Clefs CEA* N° 47, Hiver 2002-2003, pp. 10-12 et 18-19.

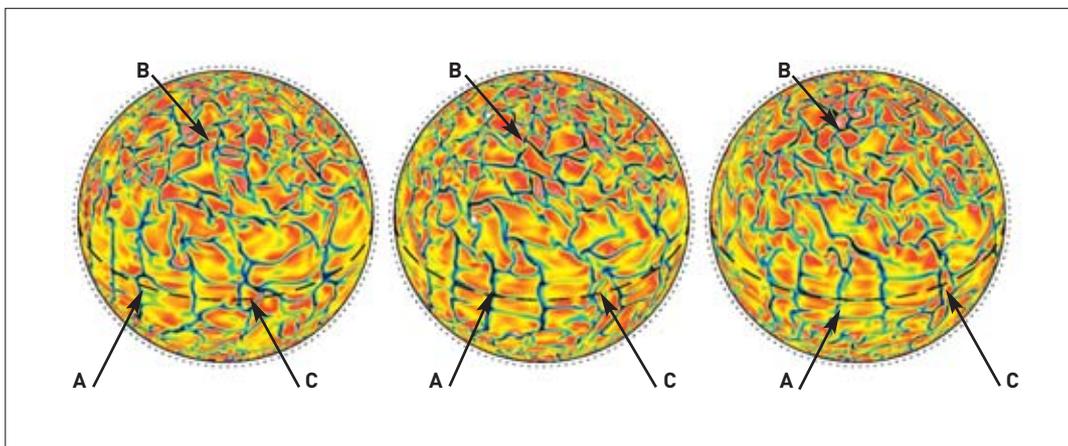


Figure 1. Évolution temporelle de la vitesse radiale dans une simulation globale tridimensionnelle de la convection sous l'influence de la rotation. Sont représentés en bleu les flots descendants et en jaune-rouge les flots montants. Chaque image est séparée de 5 jours. Les marqueurs A, B et C suivent des motifs convectifs particulièrement intéressants.



bleu) sont plus étroites que les larges flots montants (en jaune-rouge). Les cellules à plus haute latitude évoluent, se mélangent entre elles et se disloquent par la formation de nouvelles structures. Aux interstices des lignes de flots descendants, des structures cycloniques, qui tournent dans le sens des aiguilles d'une montre dans l'hémisphère Sud et inversement dans l'hémisphère Nord, sont visibles. Ces structures, dénommées panaches, correspondent à des tubes de vorticité (de rotation) intense et traversent toute la zone convective en profondeur. Plus près de l' quateur, il faut noter que les motifs convectifs sont moins **isotropes** qu'à plus haute latitude et plus alignés avec l'axe de rotation (direction nord-sud). Ces structures sont également étirées et cisailées par un écoulement horizontal à grande échelle: la *rotation différentielle*.

Comprendre la rotation différentielle solaire

L'observation du Soleil révèle que sa surface tourne avec une vitesse de rotation qui varie en latitude, de 25 jours à l' quateur jusqu'à 35 jours aux pôles. Les modèles de convection en géométrie sphérique sous l'influence de la rotation permettent d'étudier l'établissement d'un tel profil de rotation différentielle. Sous l'influence de la rotation, les mouvements convectifs s'organisent différemment, par exemple en s'alignant et en s'inclinant en direction de l'axe de rotation (encadré 2). C'est particulièrement vrai

des panaches convectifs qui sont à l'origine de l'accélération équatoriale observée dans les simulations. La figure 2, qui représente la rotation différentielle en profondeur et en latitude accompagnant les mouvements convectifs observés à la figure 1, révèle, d'une part, que toute la bande équatoriale tourne plus rapidement et, d'autre part, que la rotation différentielle ralentit jusqu'à tourner 30 % moins vite aux pôles. Vers 45-70  de latitude, la rotation est constante le long des lignes radiales, comme l'indiquent les lignes les plus horizontales dans le schéma de droite montrant des coupes radiales à latitude fixée de la rotation. Cette rotation différentielle est largement à l'origine de l'**advection** des cellules convectives (vers la droite à l' quateur et vers la gauche aux latitudes plus élevées) (cf. marqueurs de la figure 1). L'accord entre les simulations globales de la convection et les observations **héliosismiques** est raisonnable. Cela démontre que les modèles de convection turbulente tridimensionnels commencent à devenir réalistes pour décrire les mouvements aux grandes échelles observés dans le Soleil. Le profil de rotation est établi par la redistribution continue du moment cinétique⁽²⁾ contenu dans la coquille convective en rotation. En particulier, les corrélations des trois composantes de la vitesse (ou *tenseur de Reynolds*) transportent le moment cinétique depuis les hautes latitudes vers l' quateur, accélérant ainsi cette portion de la zone convective.

Une caractéristique importante du profil de rotation solaire est qu'il devient constant dans l'**intérieur radiatif**, la transition entre la rotation différentielle et la rotation solide se faisant très rapidement dans une zone à très fort cisaillement appelée **tachocline**. Cette *couche limite* est cruciale pour comprendre la dynamo solaire et il est prévu d'adjoindre aux simulations de la zone convective une zone stable la modélisant.

Les effets de la rotation

2

La rotation, de symbole Ω , est présente partout dans l'Univers (planètes, systèmes planétaires, ** toiles**, **galaxies**...). Son effet sur un élément donné (objet solide, fluide...) dépend de la force centrifuge et de la force de Coriolis. La première tend à éloigner tout objet du centre. La seconde a pour effet de dévier tout objet en mouvement vers sa droite dans l'hémisphère Nord et vers sa gauche dans l'hémisphère Sud. Plus le système tournera vite, plus la force centrifuge dominera, jusqu'à éparpiller complètement l'objet si son amplitude dépasse la ou les forces de cohésion internes de celui-ci. Ces forces de cohésion internes sont, par exemple, pour un objet solide les forces ** lectrostatiques** entre **atomes** et pour une masse de fluide, comme une étoile, la **force de gravité**. Le Soleil tourne plutôt lentement (1 tour/28 jours) comparé à la fraise du dentiste (3000 tours/minute) ou même aux autres étoiles dont certaines tournent sur elles-mêmes en moins d'un jour. Ses mouvements **convectifs** sont donc surtout influencés par la force de Coriolis. L'effet le plus frappant de cette force est sans aucun doute la création dans l'atmosphère terrestre de cyclones. Il y a alors balance entre le gradient de pression horizontal et la force de Coriolis: les physiciens parlent d'** quilibre géostrophique**. Dans les étoiles, de tels phénomènes "météorologiques" existent également mais, tout comme sur la Terre où les cyclones ont toujours un rayon supérieur à environ 100 km, ils n'apparaissent qu'à partir d'une certaine extension spatiale, appelée **rayon de Rossby**. Dans la **zone convective** du Soleil, ce rayon se situe entre 10 000 et 30 000 km, ce qui permet de délimiter les échelles ressentant les effets de la rotation de celles ne les ressentant pas. Bien sûr, la nature **turbulente** des mouvements convectifs dans les étoiles altère cet équilibre. Par exemple, la circulation méridienne⁽¹⁾ observée dans le Soleil provient d'un tel écart à la géostrophie. Pour les étoiles tournant plus rapidement, la force centrifuge devient importante et elle tend alors à aplatir l'étoile aux pôles, la faisant passer d'une forme sphérique à une forme ovoide.

(1) Circulation méridienne:  coulement moyen sous forme de cellules dans le plan méridien.

Propriétés et rôle du champ magnétique

L'activité magnétique solaire est fascinante par sa diversité. Le diagramme d'émergence des taches solaires, présenté à la figure 3, montre une succession de bandes se propageant vers l' quateur et alternant leurs signes tous les 11 ans, formant ainsi comme des ailes de papillons. La conséquence directe d'une telle observation est que l'axe du champ magnétique solaire doit forcément s'inverser tous les 11 ans pour accompagner l'alternance des polarités – le fameux cycle des 22 ans (+/-/+)-, tel un aimant qui se retournerait régulièrement (encadré 3). En outre, dans la haute atmosphère solaire (**couronne**), des **boucles** de champ magnétique apparaissent, se développent et se reconnectent sans cesse, produisant ainsi des éruptions solaires brillantes mais accompagnées de peu d'éjection de matière. Il existe aussi des configurations de champ magnétique très complexes qui sont généralement reliées aux **régions actives** rassemblant plusieurs groupes de taches solaires et possédant de façon prédominante (70%) une structure en S ou N, selon l'hémisphère considéré. Dans ce cas, les éruptions sont beaucoup plus violentes et éjectent du plasma

(2) Le moment cinétique, ou moment de la quantité de mouvement, est le produit de la masse par la vitesse et par la distance à l'axe de rotation.

dans le milieu interplanétaire : ce sont des **éjections de masse coronale**. La régularité de l'émergence des taches solaires contraste avec l'imprévisibilité de la dynamique de surface du Soleil. Pourtant, elles sont liées car plus on s'approche du pic d'activité solaire (5 à 7 ans après le précédent retournement), plus la fréquence et l'intensité des éruptions seront grandes. Ces phénomènes magnétiques apparaissent dans le Soleil car son gaz est conducteur. La présence de particules chargées (**électrons**, ions) dans le plasma solaire permet l'induction d'un champ magnétique par les mouvements convectifs. Cet effet dynamo est à l'origine du magnétisme observé (encadré 3). Afin de pouvoir comprendre la diversité des formes que revêt le magnétisme solaire, il est nécessaire de distinguer les événements réguliers de ceux qui ne le sont pas. La théorie actuelle suppose que la dynamo solaire est séparée en dynamos petite et grande échelles. Le cycle des 22 ans, l'ordre des polarités des taches solaires dit *loi de Hale*, l'amplification de larges structures magnétiques parallèles à l'équateur sont reliés à la dynamo grande échelle qui est organisée vraisemblablement dans la tachocline à la base de la zone convective. L'activité irrégulière et le champ magnétique désordonné (éruptions, **points brillants**...) sont par contre le résultat de la turbulence présente dans l'enveloppe convective.

Les astrophysiciens du CEA ont entrepris, depuis quelques années, de prendre en compte les effets du champ magnétique et de l'influence non linéaire de la force de Laplace dans les simulations de convection turbulente en rotation. L'introduction du champ magnétique complique le système d'équations physiques à résoudre et rend les codes numériques plus lents et plus complexes. Ainsi, les modèles magnétohydrodynamiques du Soleil se font de plus en plus sophistiqués. La figure 4, qui représente la reconstruction du champ magnétique coronal à partir d'une simulation tridimensionnelle de la zone convective solaire, révèle des structures en boucles resserrées, telles les boucles magnétiques dans la couronne solaire, ainsi que des **lignes de champ** s'ouvrant vers l'extérieur, un peu comme avec les **trous coronaux** solaires. La présence d'un champ magnétique fort, créé par l'effet dynamo, modifie la convection, les courants moyens et la balance d'énergie du système. Dans l'exemple

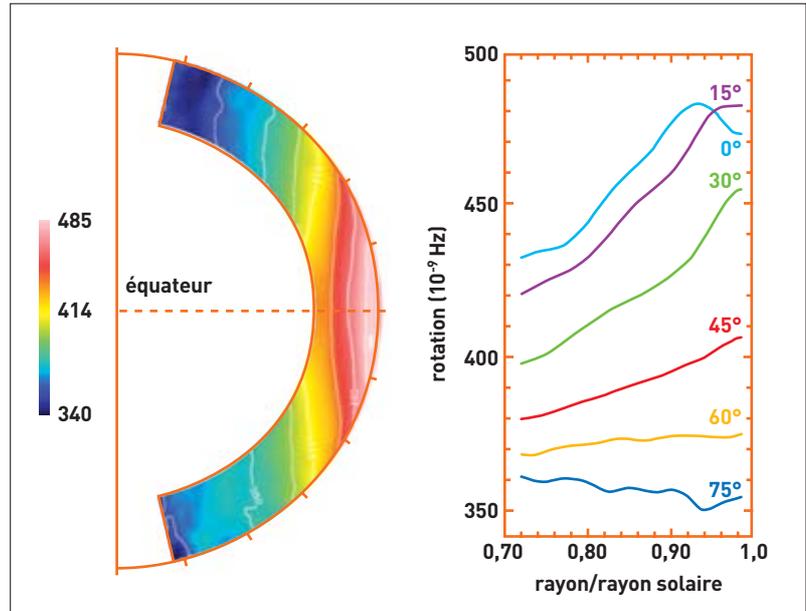


Figure 2. Représentation, dans une coupe dans le plan méridien, de la rotation différentielle en profondeur et en latitude accompagnant les motifs convectifs observés à la figure 1. Les zones de rotation rapide apparaissent en rouge et celles de rotation lente en bleu.

montré figure 4, la rotation différentielle accompagnant la convection "magnétisée" a été réduite de près de 30% en amplitude. Les champs magnétiques produits apparaissent *intermittents* et leurs composantes fluctuantes dominant par 2 ordres de grandeur les champs moyens globaux. La polarité du champ magnétique poloidal (allant d'un pôle à l'autre) se renverse dans ces simulations mais sur une période trop courte de 500 jours. En fait, le champ moyen toroidal (parallèle à l'équateur) du Soleil est proportionnellement plus important que dans les simulations et le renversement se fait tous les 11 ans. Les calculs confirment l'idée que de tels champs moyens et la régularité du cycle d'activité ne peuvent être générés dans une zone convective turbulente, mais au contraire dans une zone cisailée stable comme la tachocline. La prochaine étape consistera donc à calculer des modèles MHD du Soleil incluant une tachocline et, à moyen terme, une atmosphère plus réaliste. Dans

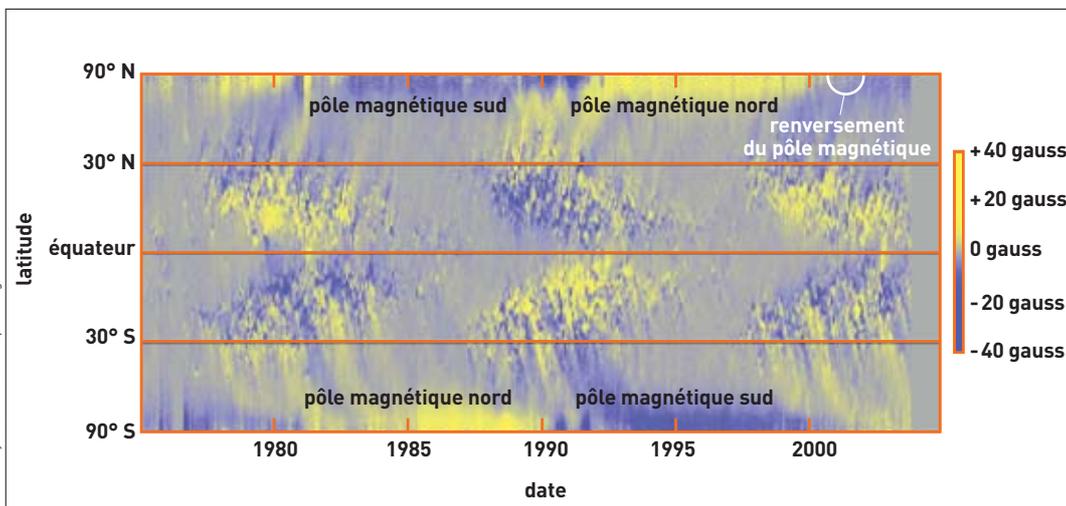
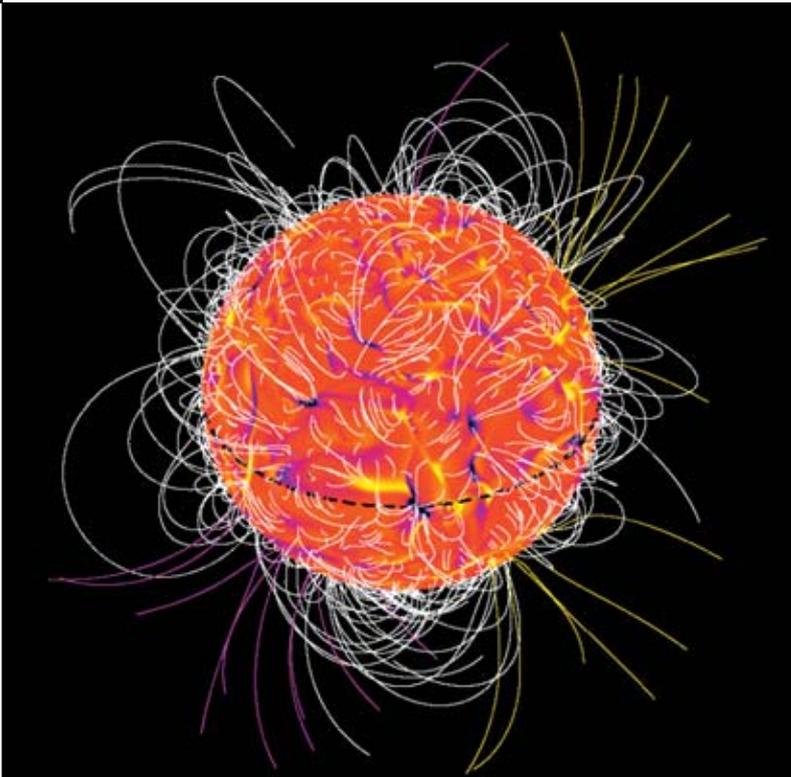
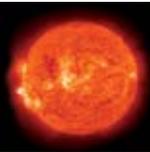


Figure 3. Diagramme papillon d'émergence des taches solaires en fonction de la latitude et du temps au cours des 3 dernières décennies. Il montre clairement la migration équatoriale des taches lors d'un cycle puis le renversement de polarité, le tout faisant un cycle complet de 22 ans (loi de Hale).



A. S. Brun/CEA

Figure 4. Reconstruction du champ magnétique coronal à partir d'une simulation tridimensionnelle de dynamo turbulente, réalisée au CEA, de la zone convective solaire. Les lignes blanches correspondent aux lignes de champ fermées et les jaunes et les violettes aux lignes de champ ouvertes. L'image de fond représente la composante radiale du champ magnétique à un rayon de 0,95 rayon solaire.

l'avenir, il deviendra possible de calculer en temps réel un modèle "météorologique" du Soleil et ainsi maîtriser plus efficacement les risques liés aux interactions Soleil-Terre. En attendant, les modèles actuels permettent de poser des jalons pour les développements futurs et d'interpréter la grande quantité de données d'observations disponibles.

> **Allan Sacha Brun**

Direction des sciences de la matière
CEA centre de Saclay

Magnétisme et effet dynamo

3

Le magnétisme⁽¹⁾ est l'étude des phénomènes magnétiques dont la manifestation physique la plus courante s'observe dans les aimants. Les effets du **champ magnétique** se retrouvent dans la plupart des objets célestes. Par exemple sur Terre, c'est le champ dit "géomagnétique" qui agit sur l'aiguille des boussoles et l'oriente sur l'axe nord-sud. Pour le Soleil, le champ magnétique peut être jusqu'à plus de 1000 fois plus intense, prenant tour à tour la forme de **taches solaires**, d'**éruptions**, de **protubérances**, de **points brillants**... Le magnétisme de la Terre et du Soleil vient de l'**effet dynamo**. Cet effet est la propriété qu'à un fluide conducteur en mouvement de pouvoir générer par induction un champ magnétique. S'il n'est pas entretenu, le champ magnétique diffuse et décroît. Seuls certains écoulements ont la capacité d'amplifier et d'entretenir le champ magnétique, ce qui est le cas des mouvements **turbulents** présents dans le Soleil. En effet, la **convection** turbulente associée à la forte rotation différentielle en profondeur et en latitude dispose des propriétés d'étirement, de cisaillement et d'enroulement nécessaires au développement d'un effet dynamo. À la présence d'un champ magnétique est associée la force de Laplace qui agit sur les mouvements du **plasma** comportant des particules chargées. L'effet de cette force peut être décomposé en une composante reliée à la tension le long des **lignes de champ magnétique** et une autre associée à un gradient de pression magnétique perpendiculairement aux lignes de champ magnétique. Comme pour la rotation, il est possible de trouver des états d'équilibre entre gradient de pression et champ magnétique, voire avec la force de Coriolis dans le cas d'un système tournant comme le Soleil. Les scientifiques parlent alors d'*équilibre magnétostrophique*. Cependant, le fort degré de turbulence présent dans les couches externes du Soleil modifie cet équilibre.

(1) Magnétisme: de Magnes, mot originaire de la ville grecque Magnesia où fut trouvée la pierre d'aimant.

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 !

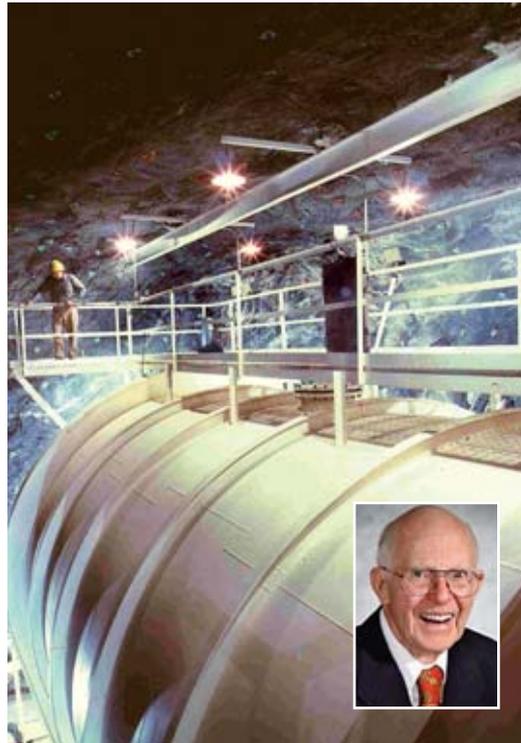
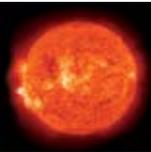
Les neutrinos solaires, une énigme enfin résolue



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.



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).

Courtoisie Brookhaven National Laboratory

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.

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 ^2H (composé d'un proton et d'un neutron), avec émission d'un **positon** et d'un neutrino, joue un rôle central : $p + p \rightarrow ^2\text{H} + e^+ + \nu_e$. 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.

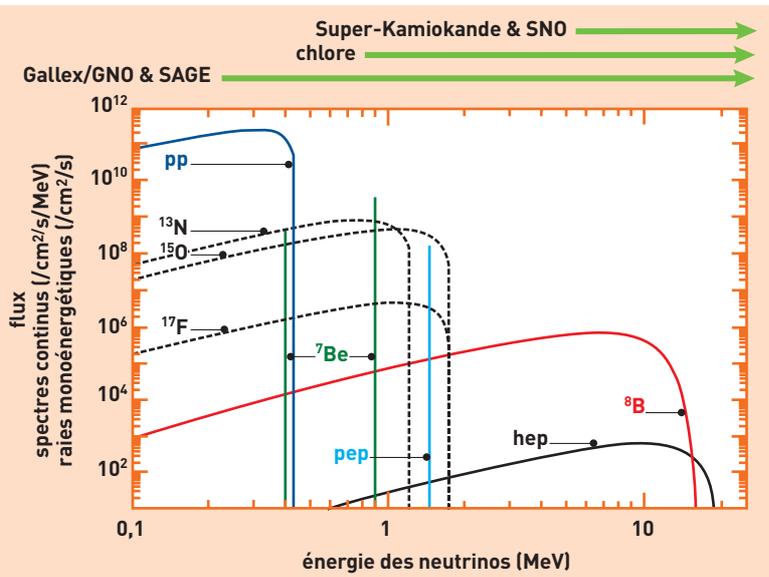


Figure 1. Le spectre en énergie des neutrinos solaires. Le flux total de neutrinos solaires sur Terre s'élève à 65 milliards par cm² par seconde. Il est dominé par les ν_{pp} (60 milliards), les neutrinos du bore n'en représentant que 6 millions. Leur énergie plus grande rend leurs détections plus aisées.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

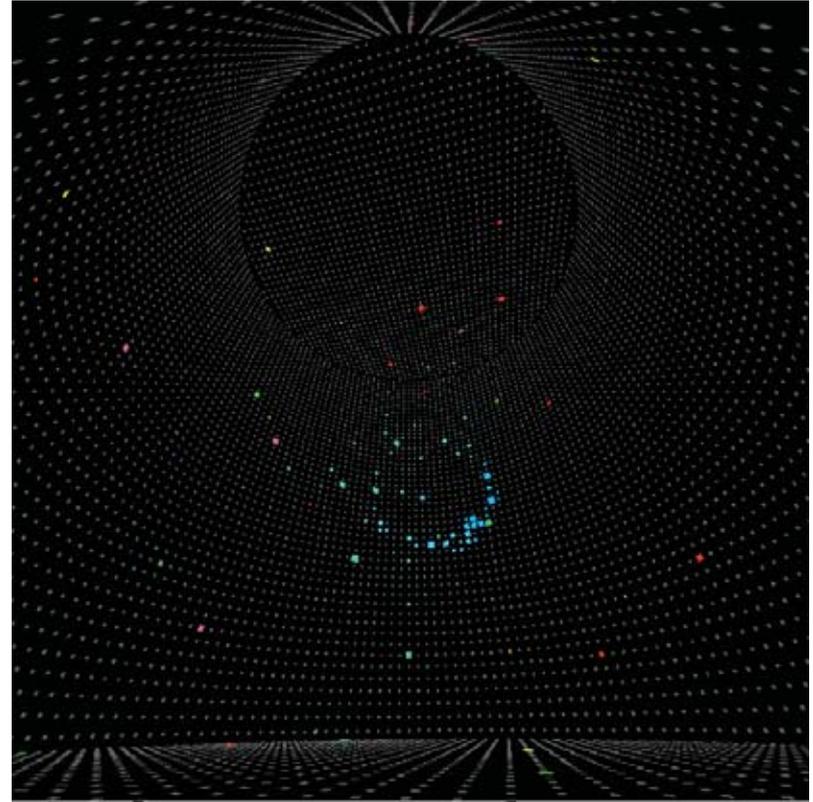
(1) Capture électronique : capture d'un électron des couches internes d'un atome par un proton qui se transforme en neutron avec éjection d'un neutrino.

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 d'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!

La traque des neutrinos solaires

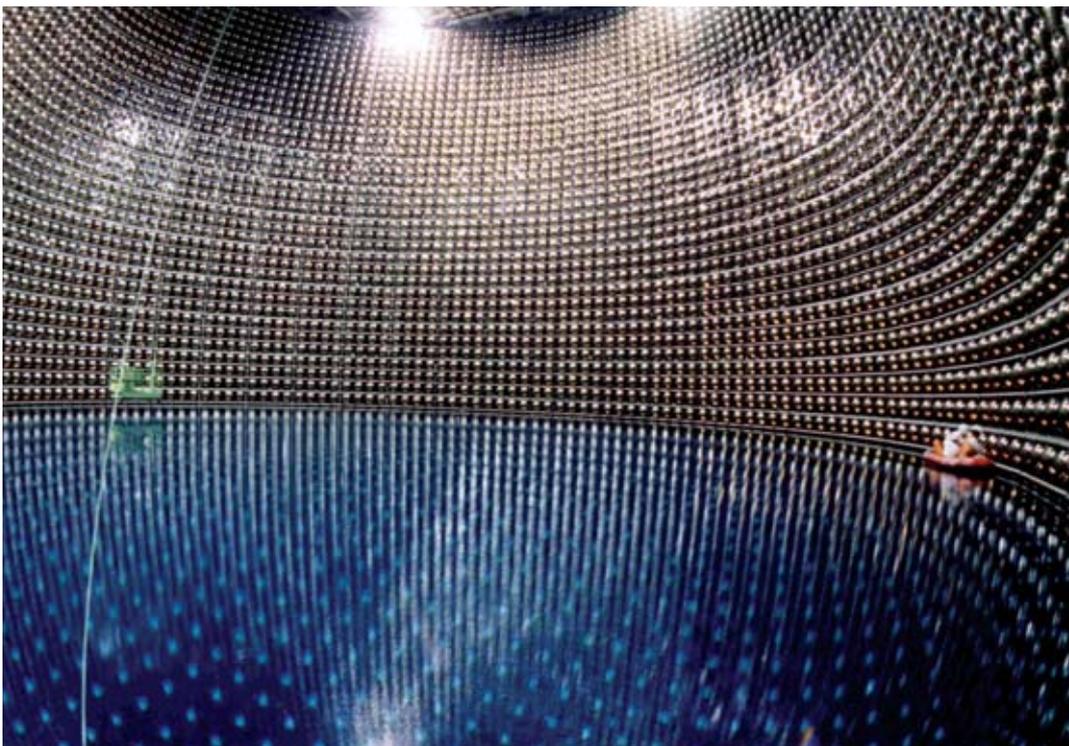
Quand Raymond Davis construit, en 1968, la première expérience pour détecter les neutrinos solaires, il utilise une réaction β inverse où un neutrino transmute du chlore en argon: $\nu_e + {}^{37}\text{Cl} \rightarrow {}^{37}\text{Ar} + e^-$. Cinq ou six



Kamioka Observatory/Tomasz Barszczak

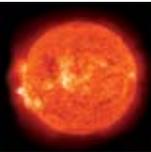
fois par an, l'argon 37 généré dans l'expérience est entraîné par un flux d'hélium. Cet **isotope radioactif** se désintègre avec une **période** de 50 jours en émettant un rayonnement caractéristique. La probabilité de cette réaction est très faible, et elle ne peut se produire que si le neutrino a 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

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.



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. 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.	première famille	électron responsable de l'électricité et des réactions chimiques sa charge est -1 masse : 0,511 MeV/c ²	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/c ²
	deuxième famille	muon un compagnon plus massif de l'électron masse : 105,658 MeV/c ²	neutrino muonique propriétés similaires à celles du neutrino électronique	étrange	un compagnon plus lourd du "bas" masse : 80 - 155 MeV/c ²
	troisième famille	tau encore plus lourd masse : 1777 MeV/c ²	neutrino tauique propriétés similaires à celles du neutrino électronique	beauté	encore plus lourd masse : 4000 - 4500 MeV/c ²
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[±], Z⁰ 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 **Z⁰** 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 **Z⁰**. 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/c² pour **W[±]** et 91 180 MeV/c² pour **Z⁰**), la portée de l'interaction faible est infime, de l'ordre de 10⁻¹⁸ m. Les bosons **W[±]** possédant une charge électrique non nulle, les fermions qui les échangent

changent de charge électrique et également de nature (**saveur**). Par contre, le boson **Z⁰** 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 **Z⁰**. De son côté, un neutrino a la faculté d'échanger un **Z⁰** 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.

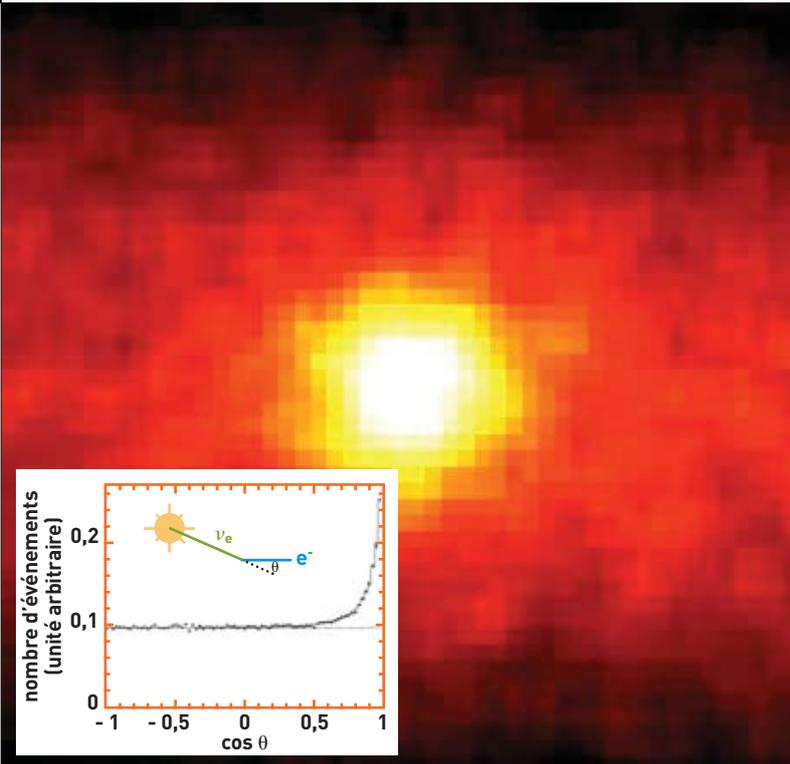
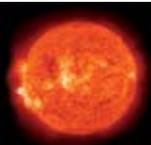
Le **graviton**, vecteur de l'interaction gravitationnelle, n'a pas encore été observé.

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.

(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).

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.



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 ($\cos \theta = 1$) plus important que celui mesuré après 5,4 années de fonctionnement. En effectuant une "pose" de 1496 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 hydruure 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 hydruure de germanium (GeH₄). 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"

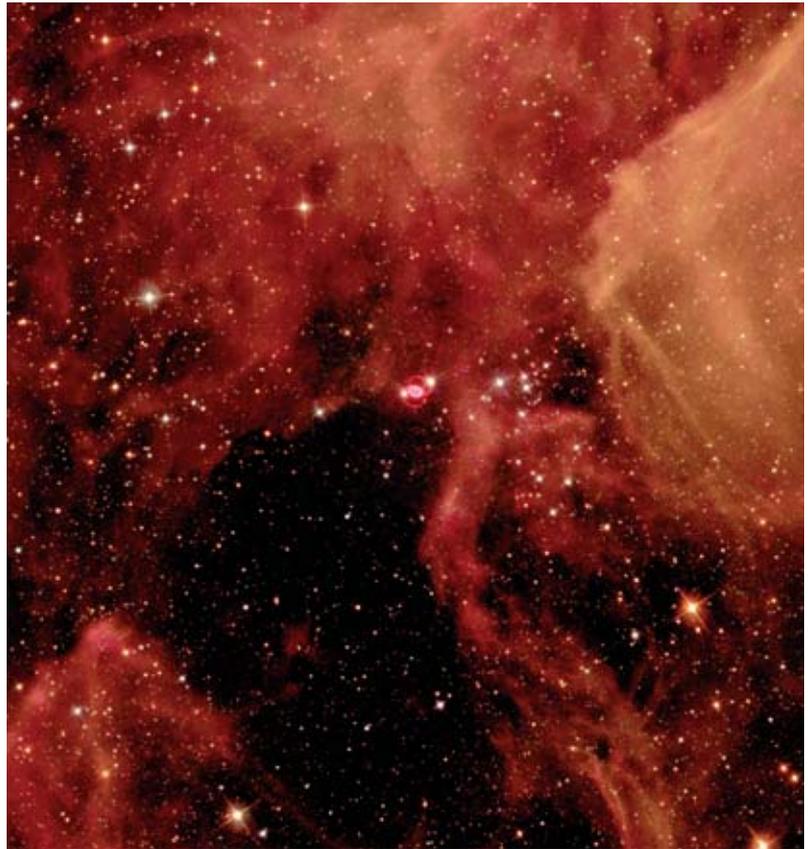
Pour détecter les neutrinos "primordiaux", les plus nombreux mais les moins énergiques, les physiciens ne trouvent qu'un seul élément sensible, le gallium. Deux expériences l'utilisant voient le jour à la fin des années 80, Gallex et Sage. Collaboration russo-américaine, Sage est installée dans un laboratoire 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: $\nu_e + {}^{71}\text{Ga} \rightarrow {}^{71}\text{Ge} + e^-$. 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 $54 \pm 6\%$ 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)

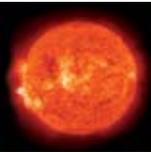
SN1987A, dans le Grand nuage de Magellan, vue par le télescope spatial Hubble. Le détecteur Kamiokande, au Japon, a capturé le 23 février 1987 une douzaine des neutrinos émis par cette supernova.

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.

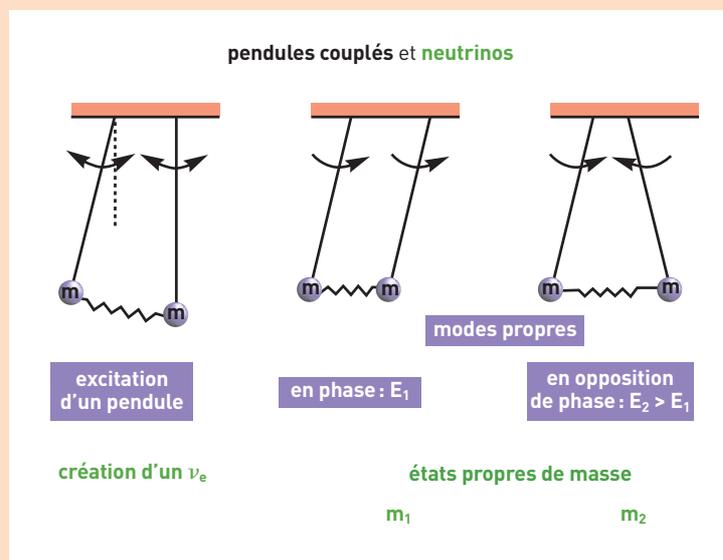
Lorsqu'un bilan du nombre d'atomes observé par rapport au nombre d'atomes attendu (compte tenu de l'activité de la source) est réalisé, l'accord est impressionnant: le rapport vaut 0,97 avec une erreur



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'analogie 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'analogie 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.

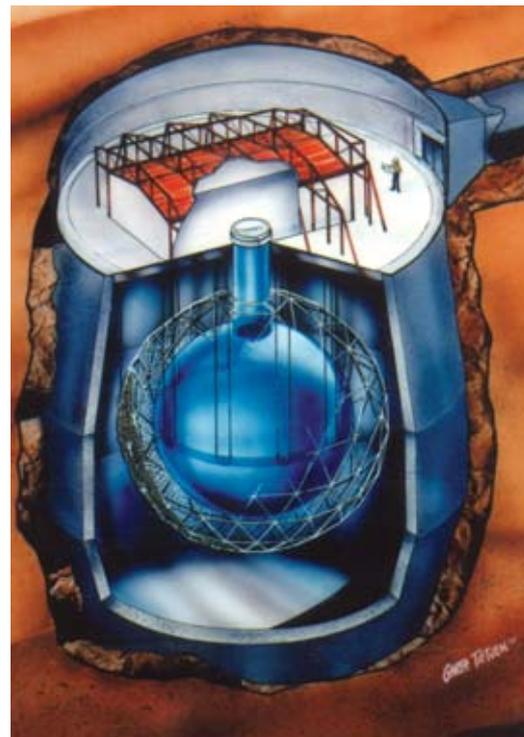
La nouvelle énigme

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



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

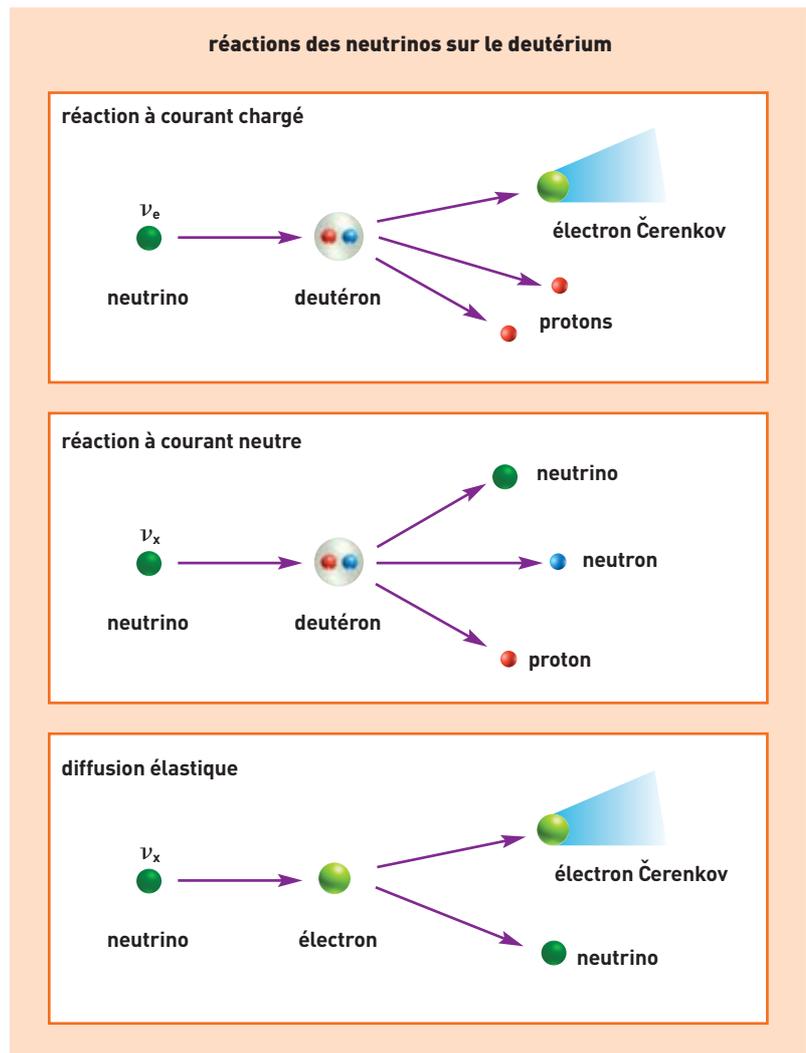


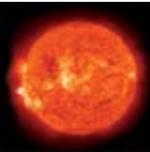
Figure 3. Les réactions utilisées dans l'Observatoire de neutrinos de Sudbury (SNO). La première donne le spectre énergétique des seuls neutrinos électroniques, la deuxième permet de mesurer le flux total de neutrinos solaires issus de la désintégration du bore 8, la troisième, sensible aux trois types 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).

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 tauïques au cours de leur périple entre Soleil et Terre.

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

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



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.

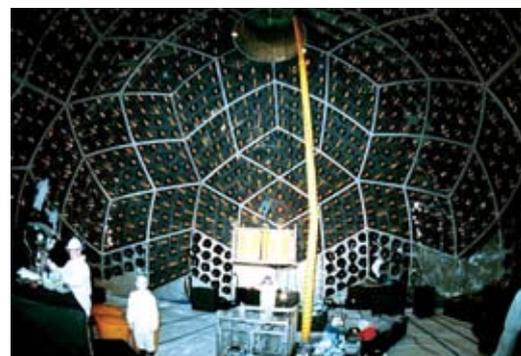
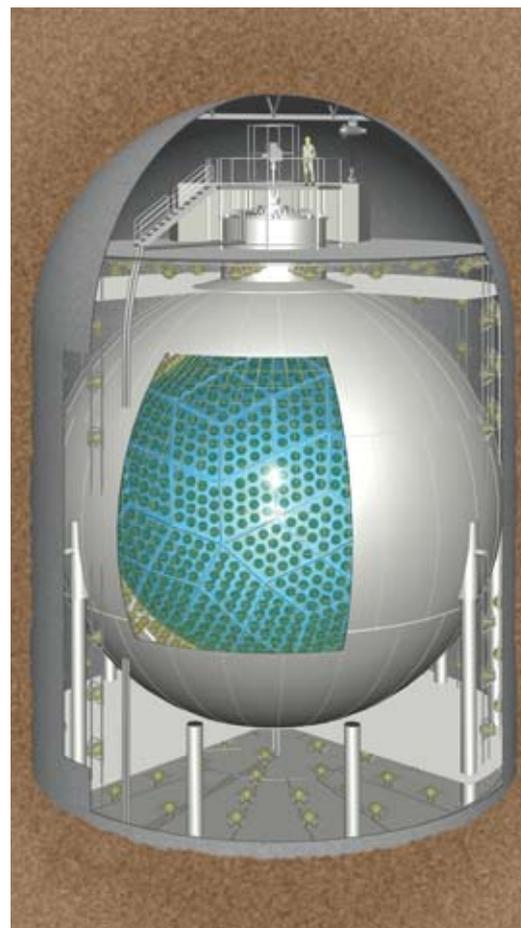
Pourquoi cette légèreté ?

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

(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.



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.

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 ?

➤ **Michel Cribier**

Direction des sciences de la matière
CEA centre de Saclay



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.

Hans Mehrlin/The Nobel Foundation

KamLAND/Stanford University