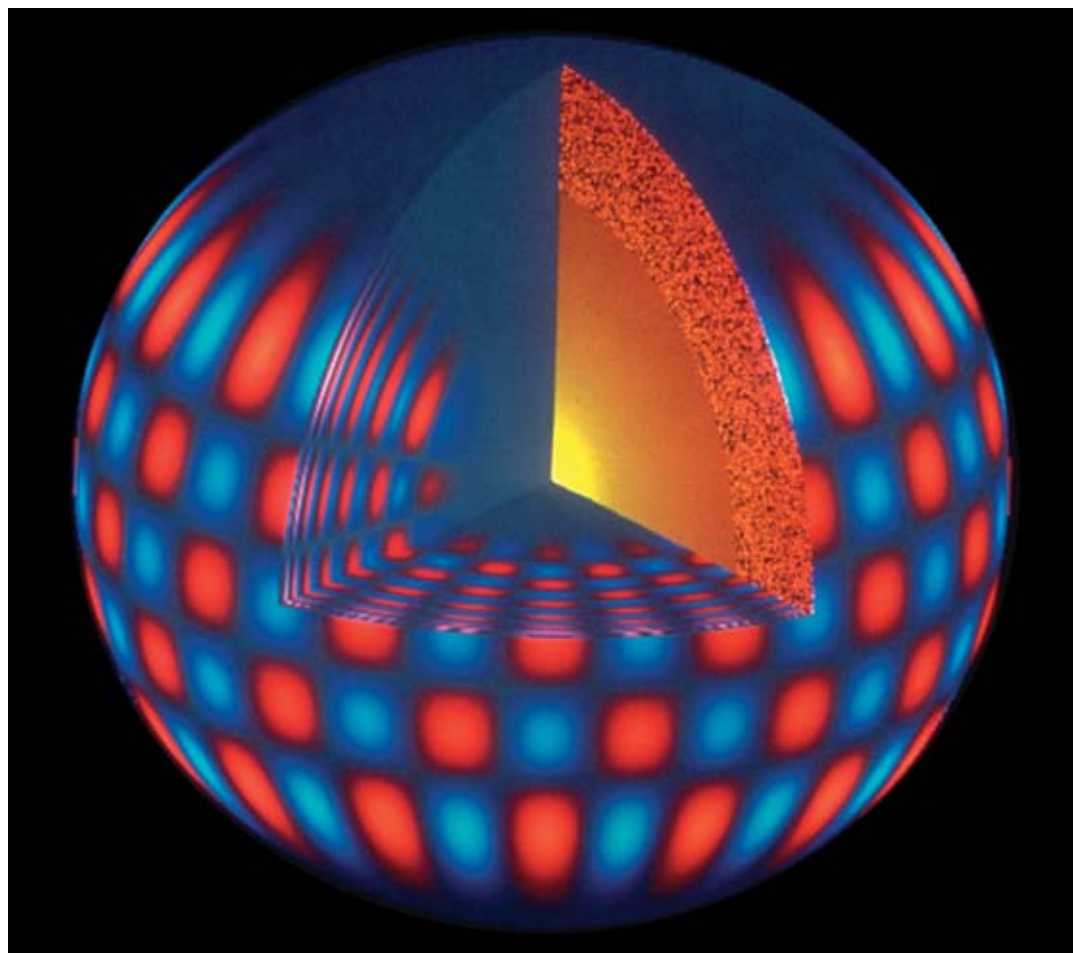


## Les mesures sismiques solaires

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).

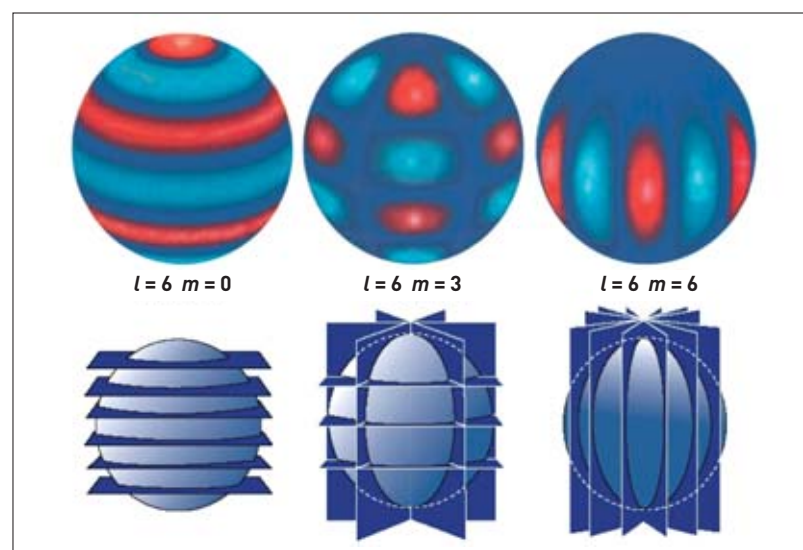
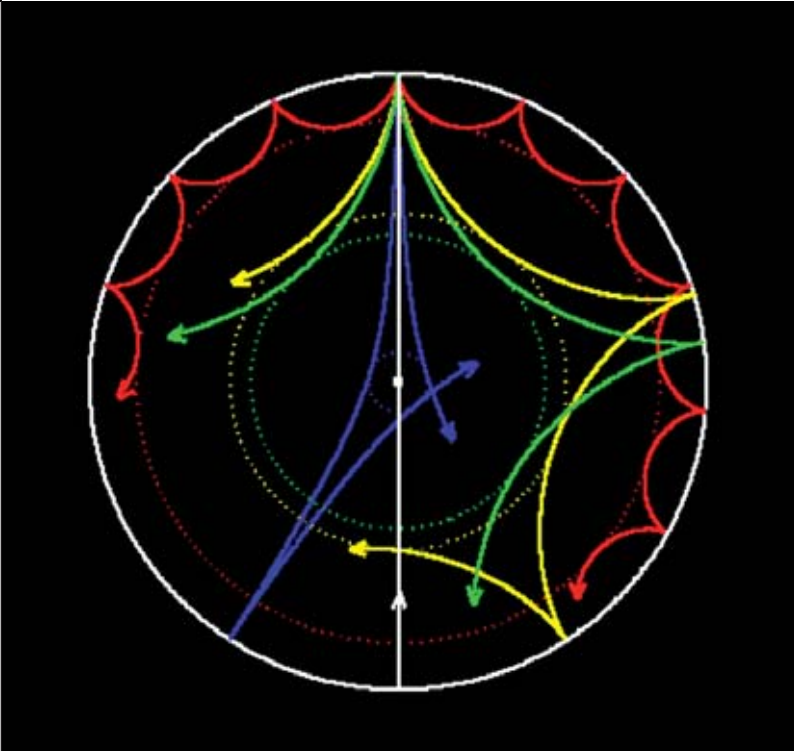
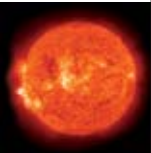


Figure 1. Exemple de 3 modes d'oscillation.

### 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

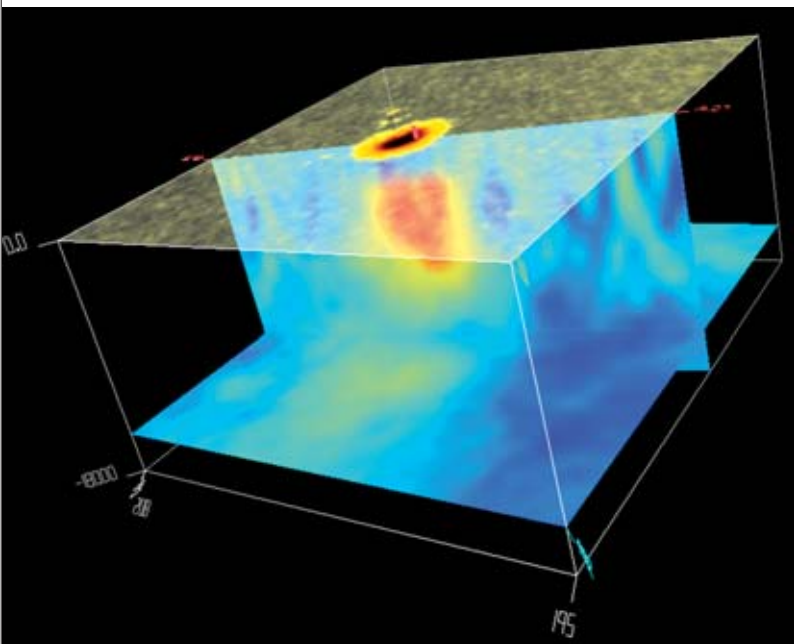


Figure 2. Profil de vitesse du son sous une tache solaire obtenu par l'instrument MDI. Les régions où la vitesse du son est plus élevée apparaissent en rouge et celles où la vitesse du son est plus lente en bleu.

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

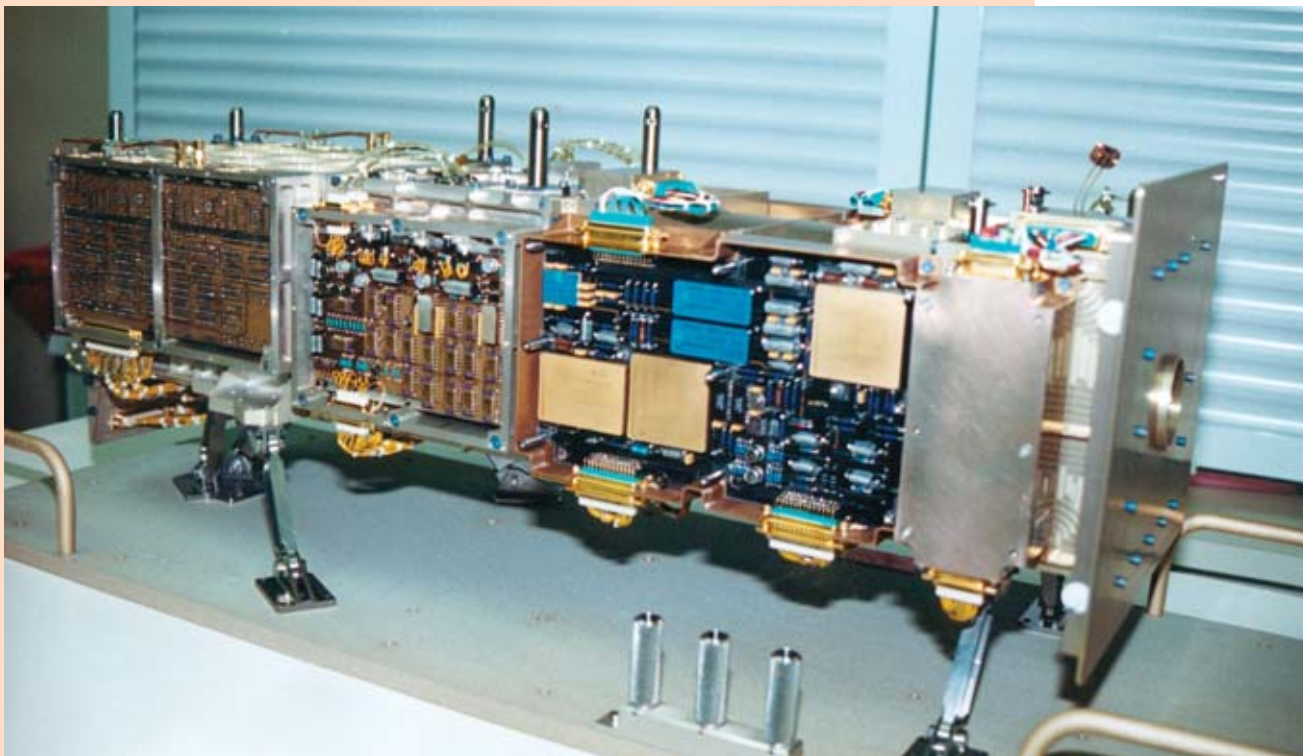
La meilleure façon de connaître les ondes internes pénétrant jusqu'au cœur du Soleil est d'employer un **spectromètre** à résonance. Il enregistre les variations périodiques de la vitesse Doppler (encadré B, *Des spectres qui en disent long*, p. 17). Dans le cas de GOLF (*Global Oscillations at Low Frequencies*), 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 continûment 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.

# 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-

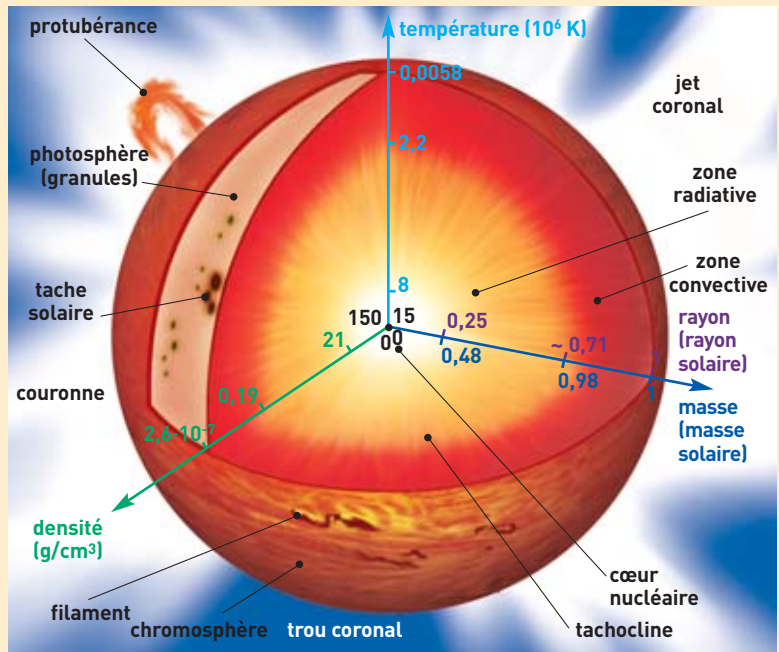


Figure.

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.

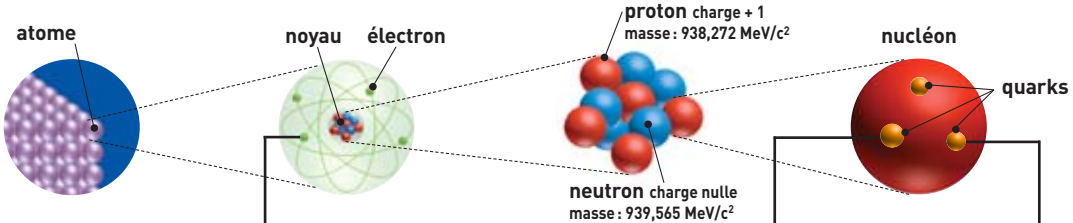
Le Soleil expulse également un flux permanent de particules chargées, principalement des **protons** et des **électrons** formant un **plasma**, appelé **vent solaire**. Celui-ci se propage hors du système solaire à une vitesse d'environ 450 km/s. Le Soleil perd environ un cent millième de milliardième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

# 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  $\mu$ , tau  $\tau$ ) participent à l'**interaction électromagnétique** et à l'**interaction faible** et les **leptons neutres** (**neutrino électronique**  $\nu_e$ , **neutrino muonique**  $\nu_\mu$ , **neutrino tauique**  $\nu_\tau$ ) ne

participent à l'**interaction électromagnétique** et à l'**interaction faible** et les **leptons neutres** (**neutrino électronique**  $\nu_e$ , **neutrino muonique**  $\nu_\mu$ , **neutrino tauique**  $\nu_\tau$ ) ne



		leptons peuvent se déplacer librement		quarks prisonniers de particules plus grandes, ils ne sont pas observés individuellement	
<b>Fermions</b> 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	<b>électron</b> responsable de l'électricité et des réactions chimiques sa charge est -1 masse : 0,511 MeV/c <sup>2</sup>	<b>neutrino électronique</b> sans charge électrique et interagissant très rarement avec le milieu environnant	<b>bas</b> sa charge électrique est -1/3 le proton en contient un, le neutron deux masse : 5 – 8,5 MeV/c <sup>2</sup>	<b>haut</b> sa charge électrique est +2/3 le proton en contient deux, le neutron un masse : 1,5 – 4,5 MeV/c <sup>2</sup>
	deuxième famille	<b>muon</b> un compagnon plus massif de l'électron masse : 105,658 MeV/c <sup>2</sup>	<b>neutrino muonique</b> propriétés similaires à celles du neutrino électronique	<b>étrange</b> un compagnon plus lourd du "bas" masse : 80 – 155 MeV/c <sup>2</sup>	<b>charmé</b> un compagnon plus lourd du "haut" masse : 1 000 – 1 400 MeV/c <sup>2</sup>
	troisième famille	<b>tau</b> encore plus lourd masse : 1 777 MeV/c <sup>2</sup>	<b>neutrino tauique</b> propriétés similaires à celles du neutrino électronique	<b>beauté</b> encore plus lourd masse : 4 000 – 4 500 MeV/c <sup>2</sup>	<b>top</b> le plus lourd de la famille (observé en 1995) masse : 174 300 ± 5 100 MeV/c <sup>2</sup>
<b>Bosons vecteurs</b> Particules fondamentales qui assurent la transmission des forces de la nature.	<b>photon</b> grain élémentaire de la lumière, porteur de la force électromagnétique	<b>gluon</b> porteur de la force forte entre quarks	<b>W<sup>±</sup>, Z<sup>0</sup></b> porteurs de la force faible, responsables de certaines formes de désintégration radioactive		
<b>Boson de Higgs ?</b>		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<sup>(1)</sup>...). 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<sup>+</sup>**, **W<sup>-</sup>** et **Z<sup>0</sup>** 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<sup>+</sup>** et **W<sup>-</sup>**, et l'**interaction faible par courant neutre** où le médiateur de l'interaction est **Z<sup>0</sup>**. Ces deux formes de l'interaction faible agissent entre tous les fermions élémentaires (quarks, leptons chargés et neutrinos). La masse de ces bosons étant très élevée (80 400 MeV/c<sup>2</sup> pour **W<sup>±</sup>** et 91 180 MeV/c<sup>2</sup> pour **Z<sup>0</sup>**), la portée de l'interaction faible est infime, de l'ordre de 10<sup>-18</sup> m. Les bosons **W<sup>±</sup>** possédant une charge électrique non nulle, les fermions qui les échangent

changent de charge électrique et également de nature (**saveur**). Par contre, le boson **Z<sup>0</sup>** étant dépourvu de charge électrique, les fermions ne changent pas de nature. En fait, l'interaction faible par courant neutre est assez similaire à l'échange d'un photon. En règle générale, si deux fermions peuvent échanger un photon, ils sont aussi capables d'échanger un **Z<sup>0</sup>**. De son côté, un neutrino a la faculté d'échanger un **Z<sup>0</sup>** 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<sup>-15</sup> 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 <sup>+</sup> , W <sup>-</sup> , Z <sup>0</sup>	à la base de la <b>fusion thermonucléaire</b> dans le Soleil, elle assure sa longévité. La <b>radioactivité</b> β <sup>-</sup> et β <sup>+</sup> et les réactions impliquant le neutrino sont des interactions faibles
forte	gluons	assure la cohésion du noyau atomique

Tableau. Interactions fondamentales.

# 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 photoélectriques 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-**

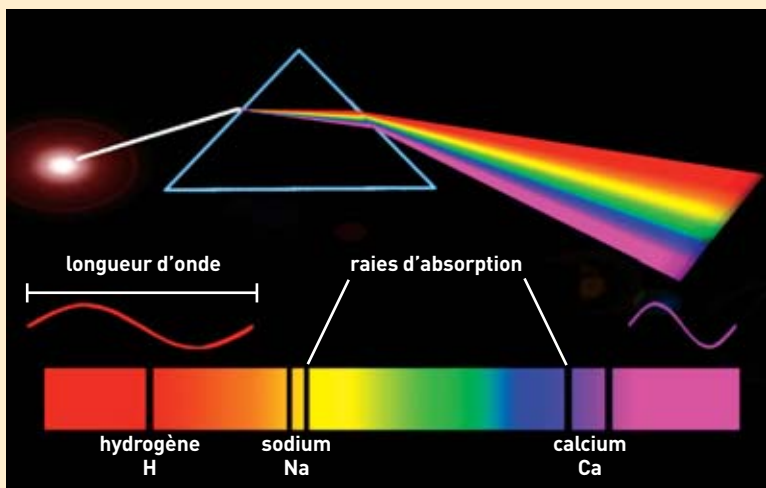


Figure a.

**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**<sup>(1)</sup>, 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.