



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

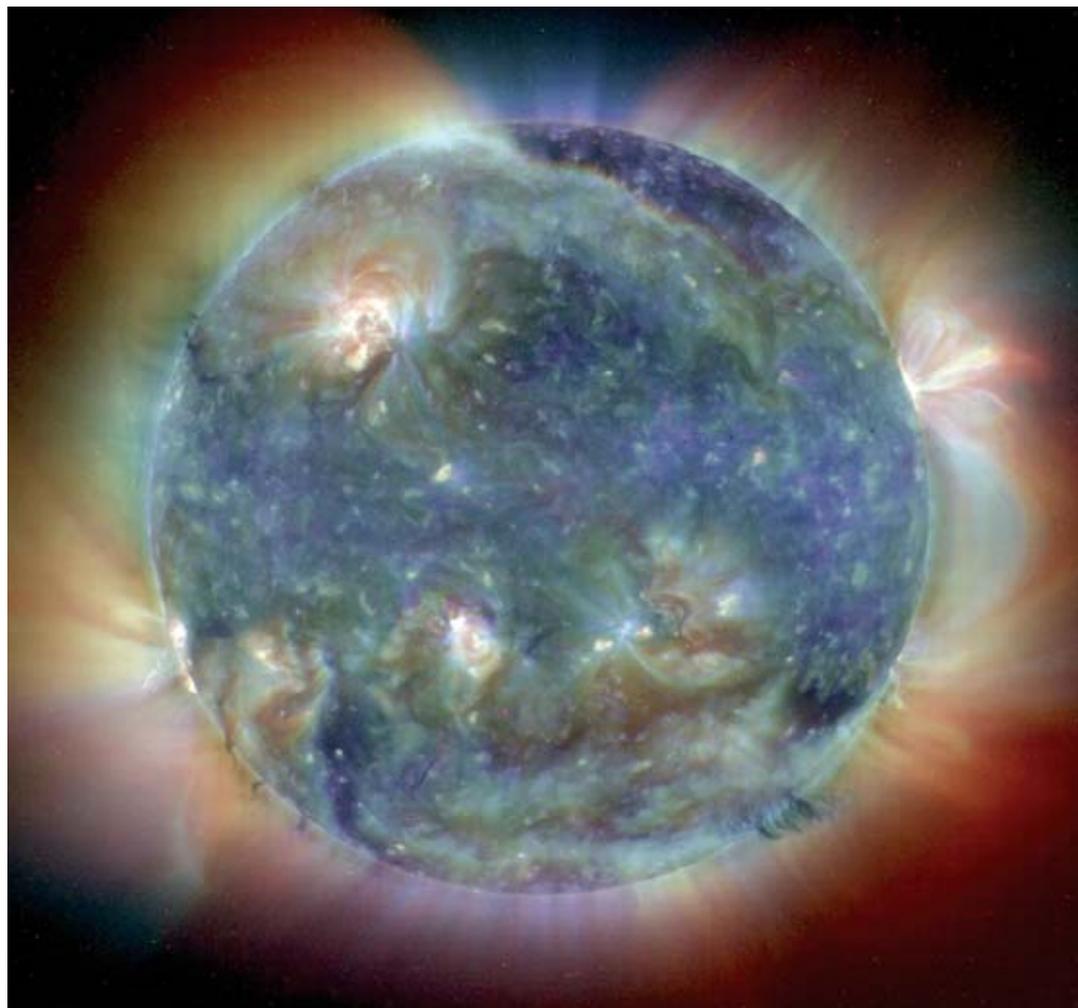


Image composite du Soleil dans trois longueurs d'onde (171 angströms pour le bleu, 195 Å pour le jaune et 284 Å pour le rouge) réalisée dans l'ultraviolet à partir des données de l'instrument EIT (*Extreme ultraviolet Imaging Telescope*) du satellite européen-américain SOHO.

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

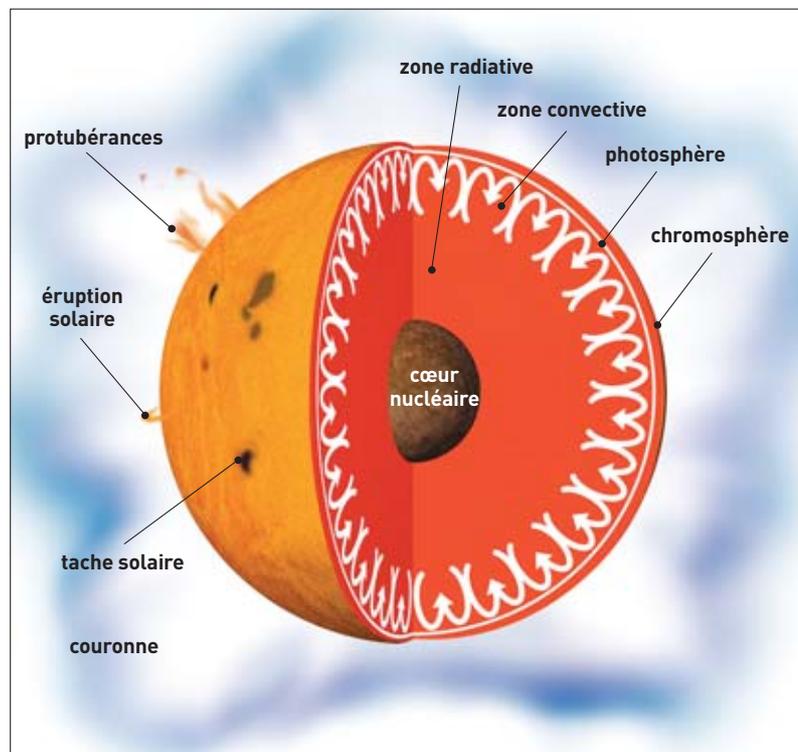
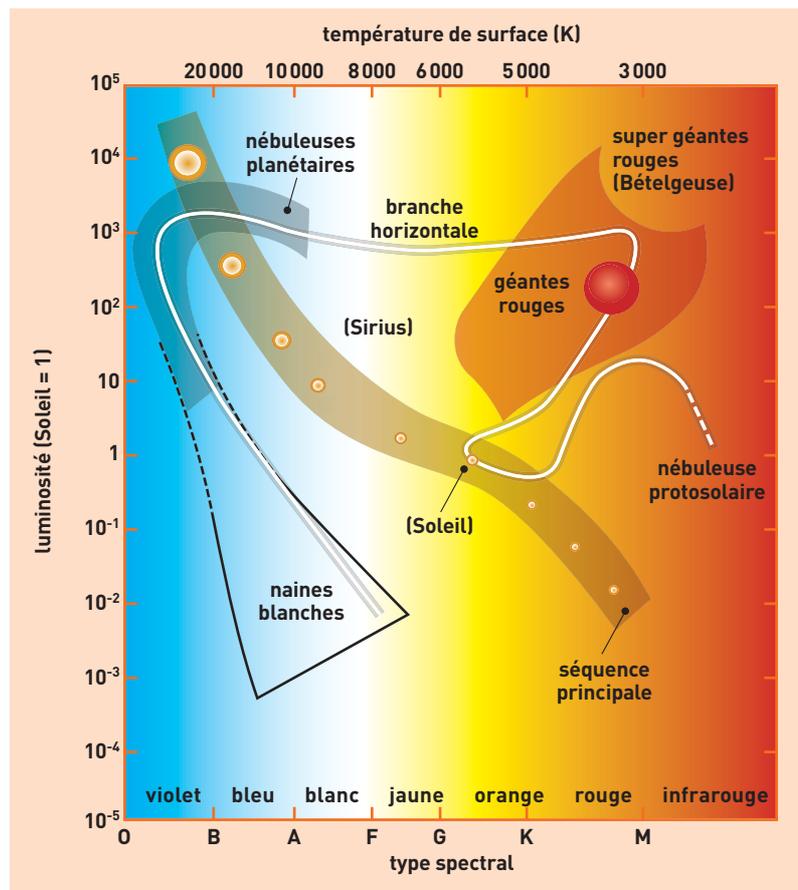
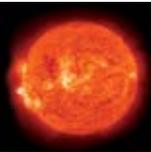


Figure 2. Schéma simplifié des principales zones solaires.

(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.



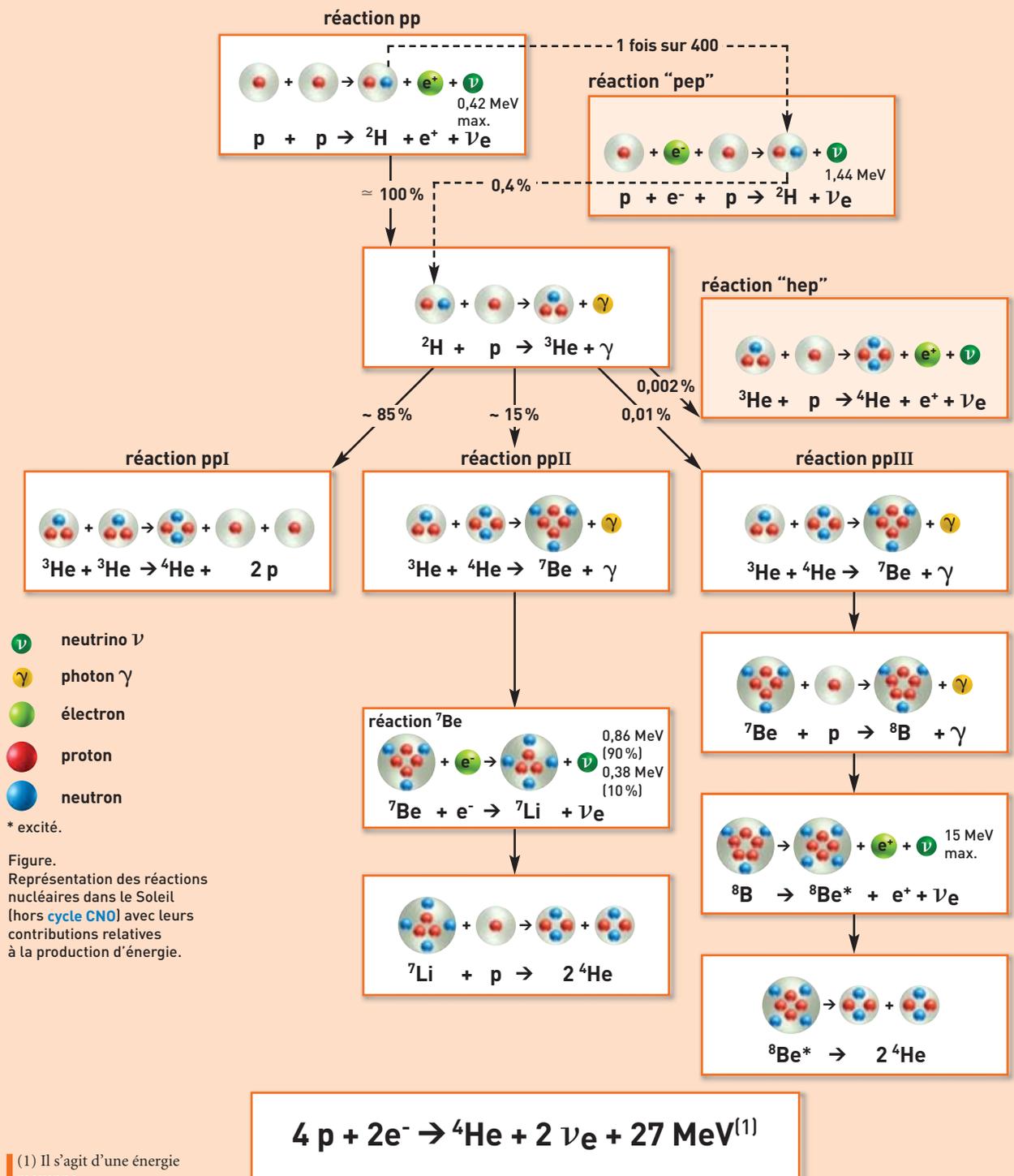
que par le calcul, et la *zone transparente*, qui laisse filtrer des messages perceptibles⁽²⁾. La **photosphère** (étymologiquement : sphère de **lumière visible**) marque la frontière entre Soleil opaque et Soleil transparent (figure 2). Sa composition, analysée au moyen de la **spectroscopie** (encadré 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



(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 (suite)

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



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

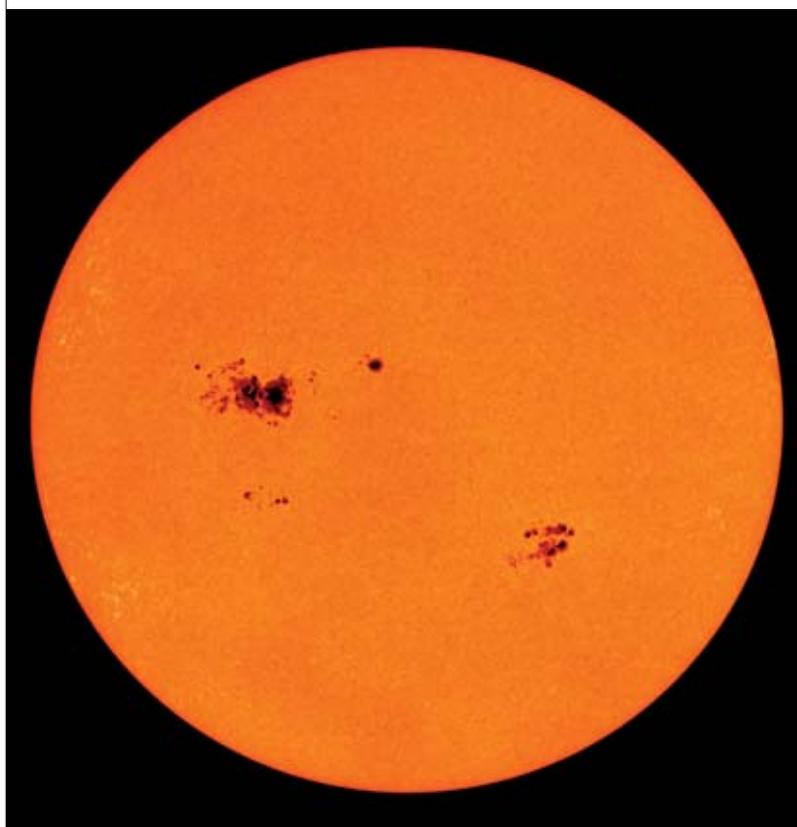
la gravitation, nous lui devons le fait que le Soleil se tient à l'intérieur de certaines limites. Chaque volume élémentaire à toutes les profondeurs est attiré vers le centre par l'attrait de la matière par la matière, et repoussé vers l'extérieur par le gradient de pression thermique. La nature réalise 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.

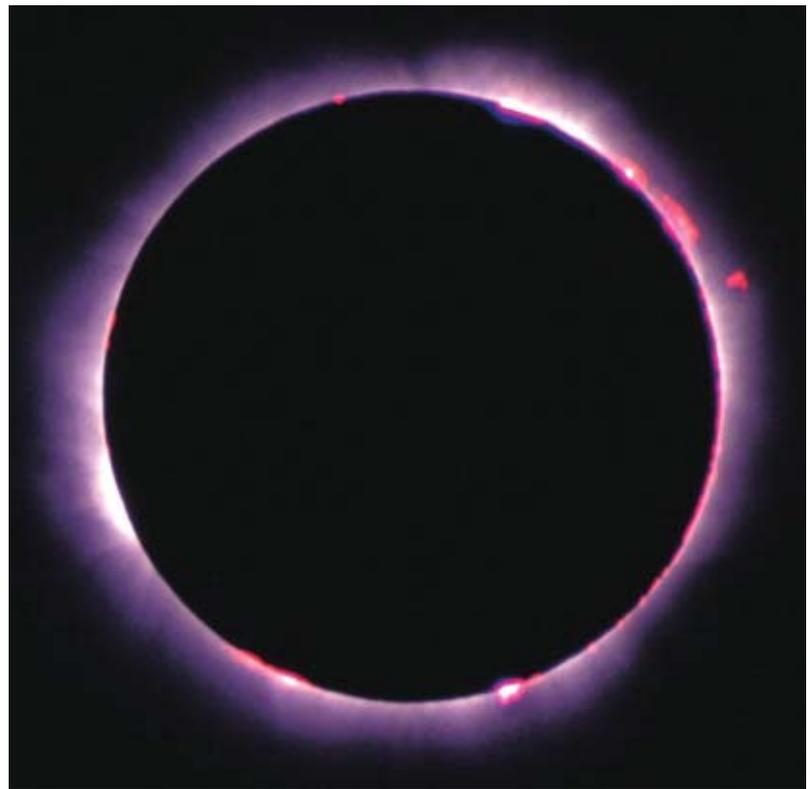
Âgé aujourd'hui d'environ 4,6 milliards d'années, le Soleil comporte suffisamment d'hydrogène dans son cœur pour qu'il prolonge sa vie lumineuse d'autant. Après avoir épuisé tout son hydrogène, il commencera à brûler l'hélium accumulé en son cœur. Il deviendra géante rouge⁽¹⁾ et demeurera 500 millions 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 baliera 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 origininaire 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*).

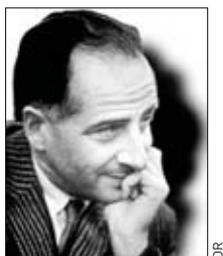
Le Soleil, ainsi parfaitement défini, devient un laboratoire où la physique la plus exotique et la plus raffinée peut être testée comme, par exemple, l'hypothèse de l'existence d'une matière noire constituée de particules fort fuyantes (WIMPs) qui, vu leur masse, se seraient accumulées au centre de l'astre.

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-

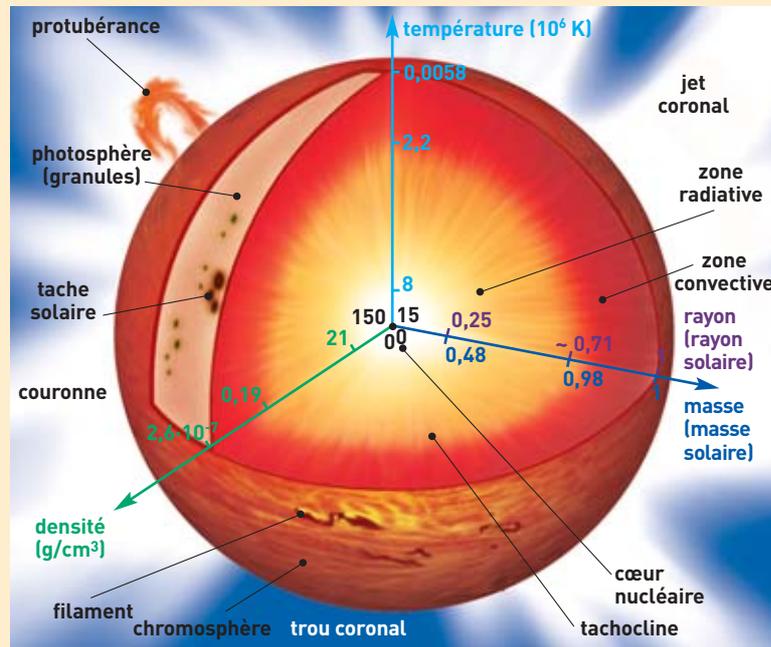


Figure.

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 millième de milliardième de sa masse par an.

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-**

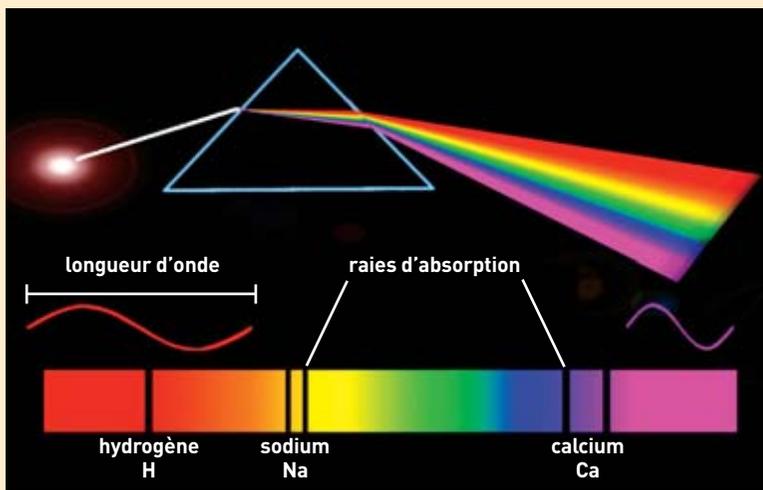


Figure a.

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**⁽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.

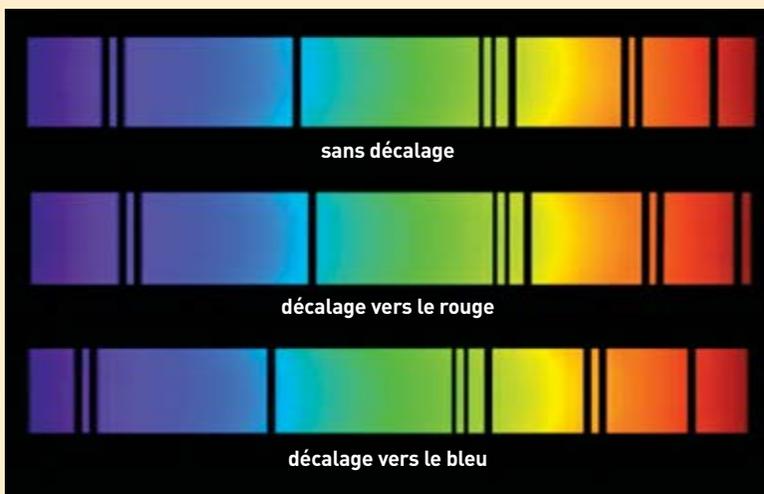


Figure b.

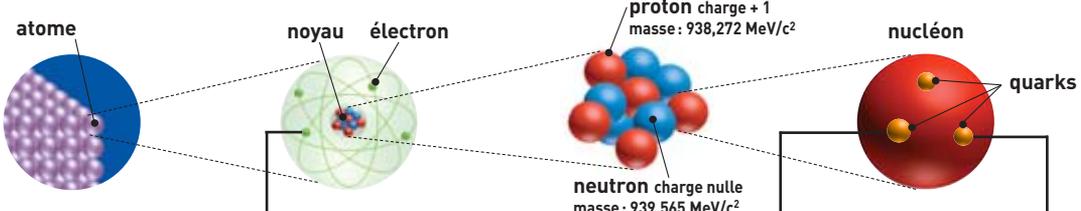
(1) Découvert par le physicien autrichien Christian Doppler pour les ondes sonores, cet effet a été étendu à l'optique par le Français Hippolyte Fizeau.

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

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	haut sa charge électrique est +2/3 le proton en contient deux, le neutron un masse : 1,5 - 4,5 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	charmé un compagnon plus lourd du "haut" masse : 1 000 - 1 400 MeV/c ²
	troisième famille	tau encore plus lourd masse : 1 777 MeV/c ²	neutrino tauique propriétés similaires à celles du neutrino électronique	beauté encore plus lourd masse : 4 000 - 4 500 MeV/c ²	top le plus lourd de la famille (observé en 1995) masse : 174 300 ± 5 100 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.