

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-

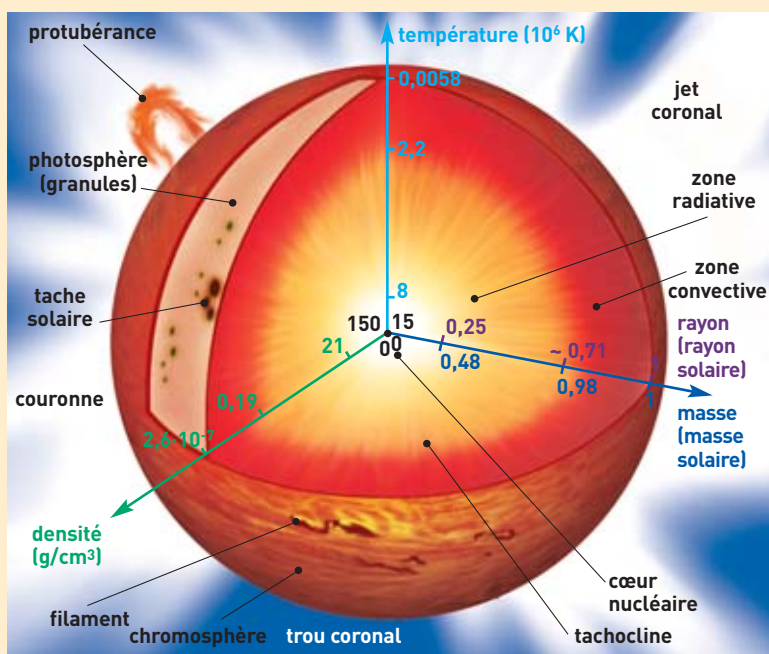


Figure.

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** 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

atome noyau électron proton charge + 1 masse : 938,272 MeV/c² neutron charge nulle masse : 939,565 MeV/c² nucléon quarks							
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.	leptons peuvent se déplacer librement		quarks prisonniers de particules plus grandes, ils ne sont pas observés individuellement				
	première famille	électron responsable de l'électricité et des réactions chimiques sa charge est - 1 masse : 0,511 MeV/c²	neutrino électronique sans charge électrique et interagissant très rarement avec le milieu environnant	bas sa charge électrique est - 1/3 le proton en contient un, le neutron deux masse : 5 – 8,5 MeV/c²	haut sa charge électrique est + 2/3 le proton en contient deux, le neutron un masse : 1,5 – 4,5 MeV/c²		
		deuxième famille	muon un compagnon plus massif de l'électron masse : 105,658 MeV/c²	neutrino muonique propriétés similaires à celles du neutrino électronique	étrange un compagnon plus lourd du "bas" masse : 80 – 155 MeV/c²	charmé un compagnon plus lourd du "haut" masse : 1 000 – 1 400 MeV/c²	
			troisième famille	tau encore plus lourd masse : 1 777 MeV/c²	neutrino tauique propriétés similaires à celles du neutrino électronique	beauté encore plus lourd masse : 4 000 – 4 500 MeV/c²	top le plus lourd de la famille (observé en 1995) masse : 174 300 ± 5 100 MeV/c²
	Bosons vecteurs	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.