

La structure du Soleil

La structure interne du Soleil est aujourd'hui encore assez mystérieuse. On pense en général que le Soleil est organisé en couches superposées autour d'un noyau central. En s'éloignant de ce noyau (appelé aussi le coeur), on trouve des couches appelées : la couche ou zone radiative, la zone convective et la photosphère qui constitue la surface "visible" du Soleil. Comme pour la Terre, une atmosphère entoure le Soleil. La couche la plus profonde de cette atmosphère solaire est appelée chromosphère, et la couche externe est nommée couronne.

Le coeur du Soleil

Le coeur est d'une très grande densité et constitue environ 50% de la masse totale du Soleil, alors qu'il n'occupe que 1,5% du volume total de l'étoile. Les conditions physiques régnant à l'intérieur du coeur sont extrêmes. La température avoisinerait les 15 millions de degrés Kelvin; elle est si élevée que les atomes sont dépouillés de leurs électrons. Ainsi, le coeur du Soleil est un mélange de protons, de neutrons, de noyaux et d'électrons libres.

La pression au coeur du Soleil est peut-être 250 milliards de fois supérieure à la pression de l'atmosphère à la surface de la Terre. L'énorme masse du Soleil ne s'effondre pas sur elle-même sous l'effet de l'attraction gravitationnelle grâce à la gigantesque pression dirigée vers l'extérieur qui est générée par la chaleur du coeur. En outre, le Soleil n'explose pas comme une bombe à hydrogène à cause de la masse prodigieuse de gaz entourant le coeur.

La densité du coeur du Soleil est extrêmement élevée. C'est dans cette zone que se situe la fournaise nucléaire où est produite l'énergie du Soleil. S'il était possible de regarder dans le coeur, tout apparaîtrait noir, puisque l'énergie qui y est produite ne s'étend pas dans la partie visible du spectre. Le Soleil produit principalement des rayons gamma en ondes courtes. Lorsque ces rayons se percutent, cela occasionne des pertes d'énergie, créant ainsi des rayons X qui restent encore invisibles à l'oeil humain.

La zone radiative

Les rayons X produits au coeur du Soleil remontent progressivement à la surface, se frayant un chemin dans des "bulles" où la température, la pression et la densité sont plus faibles. La zone radiative occupe environ 70% du volume compris entre le coeur et la surface du Soleil. Des noyaux d'hydrogène et d'hélium, ainsi que des électrons libres occupent cette zone. [...] La zone radiative est donc saturée d'hydrogène ionisé et d'atomes d'hélium. Ce mélange de gaz ionisés à haute température et d'électrons est appelé plasma et est considéré parfois comme un quatrième état de la matière.

Dans les profondeurs de la zone radiative, les rayons X entrent en collision avec des particules, ce qui les entraîne dans des directions aléatoires. Plusieurs collisions peuvent survenir à quelques millimètres d'intervalle, modifiant sans cesse la direction des rayons X.

Cependant, ceux-ci poursuivent leur voyage vers la surface, ce qui pourra leur prendre quelques millions d'années. Cette durée semble d'autant plus incroyable lorsqu'on se rappelle que les rayons X se déplacent à la vitesse de la lumière. Pour schématiser, on peut dire que les rayons solaires responsables de votre dernier bronzage sont issus d'une réaction nucléaire survenue au coeur du Soleil il y a peut-être un million d'années.

Les collisions subies par les rayons X dans la zone radiative causent une perte de leur énergie. Ainsi, leur longueur d'onde augmente progressivement au fur et à mesure qu'ils se rapprochent de la zone convective. Ils finissent par devenir de la lumière visible.

La zone convective

Les photons arrivent à la zone convective, 150 000 km sous la surface du Soleil, où la température est légèrement inférieure à un million de degrés Kelvin. Les noyaux sont alors capables de se joindre aux électrons, formant ainsi des atomes. La lumière appauvrie en énergie est absorbée par les atomes gazeux qui la retiennent au lieu de la faire "rebondir" ou de la ré-émettre. Ces atomes bloquent donc le flux sortant d'énergie solaire en l'absorbant, ce qui augmente leur température de façon extrême. Les courants de convection, semblables à ceux que l'on peut observer dans de l'air ou du liquide chauffé, entraînent l'énergie solaire vers la photosphère dans des rivières bouillonnantes de gaz brûlants. Puisque la température du gaz ayant absorbé l'énergie dans les profondeurs de la zone convective augmente, le gaz se dilate et devient moins dense que son environnement immédiat. Ces poches de gaz chauds, grâce à leur densité faible remontent jusqu'à la surface de la zone convective comme des ballons d'air chaud lors d'une fraîche matinée. A la surface de la zone convective, elles se déchargent de leur excès d'énergie, puis replongent. Il s'agit d'un effet "tapis roulant" avec les gaz chauds qui montent et les gaz froids qui descendent.

A la frontière de la zone convective et de la photosphère, le gaz est soumis à de fortes turbulences, il s'élève au centre de structures appelées cellules de convection (super granules), se déplace jusqu'aux limites de ces cellules, puis replongent. Ces phénomènes survenant aux limites des cellules, où des plasmas ayant des champs magnétiques opposés entrent en collision et où l'énergie magnétique est convertie en mouvement, sont probablement à l'origine de la température élevée de la couronne et de l'accélération des particules de vent solaire qui seront collectées par Genesis.

Curieusement, bien qu'il ait fallu au rayonnement des millions d'années pour atteindre les zones profondes de la zone convective, il traverse ensuite cette couche en seulement trois mois, environ. Toute l'énergie émise dans l'espace depuis la surface du Soleil a été transportée là par convection ⁽¹⁾.

La photosphère

Il s'agit de la surface brillante et "visible" du Soleil. Comme elle est composée de gaz, ses limites extérieures sont assez difficiles à définir. Elle a probablement plusieurs centaines de kilomètres d'épaisseur.

Les températures dans la photosphère sont plus basses que dans la zone convective et la densité du gaz est assez faible (estimée tout au plus à un millionième de la densité de l'eau). Les atomes gazeux ne bloquent plus le flux d'énergie. En se refroidissant, les atomes libèrent une fois encore leur excès d'énergie sous forme de rayonnement qui navigue ensuite librement dans l'espace et qui finalement favorise la vie sur Terre.

La photosphère est d'aspect granuleux. Elle constitue la zone sur laquelle les astronomes ont très tôt focalisé leur attention. C'est là que les taches solaires ont été découvertes. Ces taches vont et viennent suivant un cycle régulier de 11 ans. Mais des incertitudes demeurent au sujet des forces qui régissent leur apparition et leur disparition. Les taches varient en taille et apparaissent souvent en groupe qui s'étendent sur plusieurs centaines de millions de km² à la surface du Soleil. Elles ont un aspect sombre car elles ont une température inférieure à celle de la surface qui les entoure. On pense que les taches apparaissent suite à une inhibition temporaire des courants de convection causée par de puissants champs magnétiques localisés. En d'autres termes, si un courant de convection est empêché d'apporter sa charge d'énergie thermique à la surface, la zone desservie par ce courant est refroidie et une tache apparaît.

Les périodes de forte concentration de taches solaires correspondent avec un grand nombre d'événements solaires spectaculaires tels que les CME (coronal mass ejection) et les proéminences qui perturbent souvent les communications électroniques et peut-être même les cycles météorologiques terrestres.

La chromosphère

La basse atmosphère du Soleil, la chromosphère, échappa à l'examen des premiers astronomes à cause de la brillance de la photosphère. La quantité relativement faible de lumière émise par la chromosphère est uniquement visible à l'oeil nu lors d'une éclipse solaire totale, quand la Lune cache la lumière issue de la photosphère. La chromosphère apparaît alors pendant un court laps de temps sous la forme d'un ruban rouge brillant qui entoure la silhouette de la Lune. Les astronomes modernes ont pu étudier la chromosphère à leur convenance grâce à la grande variété d'instruments à leur disposition. Les astronomes amateurs ne doivent jamais tenter d'observer la chromosphère à l'oeil nu.

La chromosphère constitue une région passionnante et unique parmi les paysages solaires. Les astronomes y ont découvert une foule de structures exotiques éphémères, parmi lesquels des

spicules⁽²⁾, des proéminences et des plages⁽²⁾. Les spicules⁽²⁾ sont abondants mais d'une courte durée de vie., semblables à des jets de gaz brûlants s'élevant au dessus de la chromosphère. Les proéminences sont plus impressionnantes et plus photogéniques, prenant la forme de brillantes arches atteignant le sommet de la chromosphère et s'étendant souvent dans la couronne. Certaines sont aussi large que d'autres peuvent mesurer la moitié du diamètre du Soleil. Les proéminences sont souvent associées aux taches solaires. Les proéminences passives peuvent conserver leur forme pendant des mois avant de disparaître; d'autres, appelées proéminences éruptives, éclatent depuis la chromosphère pour former des structures filamenteuses de gaz brûlants.

Les plages⁽²⁾ sont des phénomènes brillants semblables à des nuages que l'on peut observer à proximité des taches solaires.

Les CME (coronal mass ejection) sont incroyablement riches en énergie et sont étroitement liées aux proéminences. Ces phénomènes débutent habituellement par la formation de structures incurvées qui explosent au bout de quelques heures déversant de la matière solaire dans l'espace, dont une grande quantité de rayons X et ultraviolets. Ce rayonnement arrive sur Terre huit minutes plus tard et peut perturber sérieusement la ionisation de la haute atmosphère terrestre. Ceci peut provoquer les problèmes majeurs sur les communication et les systèmes de fourniture d'énergie. Après environ vingt-quatre minutes, une seconde vague atteint notre planète. Il s'agit de protons hautement chargés en énergie qui peuvent s'avérer extrêmement dangereux pour les astronautes en mission dans l'espace. Enfin, après un ou deux jours, la Terre est frappée par une onde de choc magnétique qui voyage à plus de 960 kilomètres par seconde. En 1989, une des CME les plus violentes explosa causant une panne d'énergie dans toute la province du Québec et engendrant une aurore boréale visible dans des régions aussi méridionales que Key West en Floride.

La puissance de CME est inimaginable. Leur température peut atteindre 50 millions de degrés Kelvin, ce qui est plusieurs fois supérieur à la température du coeur du Soleil. Si la puissance d'une seule CME pouvait être exploitée, elle suffirait pour satisfaire les besoins en énergie des habitants de la Terre pendant plusieurs millions d'années.

Les phénomènes spectaculaires survenant dans la chromosphère semblent avoir pour cause la force dominante de l'atmosphère solaire, le magnétisme. A l'opposé des plasmas contenus dans les zones profondes, les plasmas de l'atmosphère solaire sont très diffus et sont incapables de retenir le puissant champs magnétique de l'étoile. Ce sont plutôt les champs magnétiques qui dictent leurs lois aux plasmas de l'atmosphère, donnant naissance aux singulières particularités de cette région. Les proéminences sont ainsi créées quand le plasma est capturé par les champs magnétiques, puis rabattu dans la chromosphère.

La couronne

La couche de la plus externe de l'atmosphère solaire apparaît en quelque sorte comme la plus mystérieuse. Contrairement à ce qu'on pourrait croire en tenant compte des lois de la thermodynamique, la température de la couronne augmente régulièrement pour passer d'un minimum de 4 000 degrés Kelvin environ à plus d'un millions de degrés Kelvin. Ce qui fait de la couronne la deuxième zone la plus chaude du Soleil après le cœur. Comment est-il possible que la chaleur soit amenée d'un endroit "frais" (la chromosphère) à un endroit chaud (la couronne) ? Bien que les astrophysiciens aient des doutes au sujet du mécanisme de transfert d'énergie à la couronne, certains pensent que ce phénomène résulte du transport d'ondes magnétiques par les champs émergents du Soleil.

Les gaz incroyablement diffus et chauds de la couronne atteignent des distances de plusieurs millions de kilomètres dans l'espace. Une éclipse totale montre la couronne sous la forme d'un halo lumineux blanc entourant le disque solaire. [...] La forme de la couronne est synchronisée avec le cycle d'activité du Soleil. Elle prend la forme d'un anneau déchiqueté lorsque le Soleil est à son maximum d'activité, et est parcouru par des volutes et des courants s'étalant sur des millions de kilomètres dans l'espace à la fin du cycle solaire. Ces courants sont à l'origine des [...] particules composant le vent solaire.

Des mystères demeurent au sujet de la structure du Soleil. L'étude du vent solaire par la mission Genesis pourra aider les astrophysiciens à comprendre les structures internes de l'étoile, ainsi que la source de lumière et de chaleur que constitue le Soleil.

(1) Convection : transport de chaleur sous l'effet d'un liquide, d'un gaz, d'un plasma [dictionnaire Hachette].

(2) Terme anglais non traduit.

Ceci est la traduction d'un document publié par le Jet Propulsory Lab de la NASA concernant la mission GENESIS et intitulé : "Solar structure. A closer look".

Adresse : http://www.genesismission.org/science/mod3_SunlightSolarHeat/SolarStructure/index.html